

E 61/79

Bautechnik-Archiv

HEFT 2



Berlin 1948

Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn

E 91/79

6.40

Bautechnik-Archiv

HEFT 2

INHALT:

Erfahrungen eines Wasserbauers

Nach einem hinterlassenen Manuskript „Mein dienstlicher Lebenslauf“ des Dr.-Ing. h. c. W. Zander, Honorarprofessor a. d. T. H., Hannover, Strombaudirektor a. D., zusammengef. von W. Paxmann, Ministerialrat i. R., Königswinter

Die Abwasserreinigung und die sich dabei abspielenden stofflichen Vorgänge

Von Prof. Dr.-Ing. E. Marquardt, Keutlingen

Über die Druckverteilung im Boden hinter Wänden verschiedener Art. Mit Ergebnissen eigener Versuche

Von Dr.-Ing. H. Press, Berlin

Mit 53 Textabbildungen



Berlin 1948.

Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten

Nachdruck, auch auszugsweise, verboten

Printed in Germany

Druck: Oskar Zach oHG., Berlin-Wilmersdorf, Berliner Straße 46

Erfahrungen eines Wasserbauers

Nach einem hinterlassenen Manuskript „Mein dienstlicher Lebenslauf“ des Dr.-Ing. e. h. Zander, Honorarprofessor an der Technischen Hochschule Hannover, Strombaudirektor a. D., zusammengefaßt von

Walther Paxmann, Ministerialrat i. R., Königswinter

Dr. Ing. e. h. Willy Zander ist am 15. April 1945 im Alter von 76 Jahren aus seinem arbeitsreichen Leben geschieden. Er hat mehr als 41 Jahre zunächst der preußischen Wasserbauverwaltung, später der Reichswasserstraßenverwaltung als höherer Wasserbaubeamter, zuletzt als Wasserstraßendirektor in Magdeburg, angehört und ist dann ununterbrochen bis zu seinem Lebensende, zeitweise als Dozent an der Technischen Hochschule Hannover, beruflich tätig gewesen. Kurz vor seinem Tode hat er seine beruflichen Erlebnisse und Erfahrungen in einem 170 Schreibmaschinenseiten umfassenden und als „Mein dienstlicher Lebenslauf“ betitelten Manuskript niedergelegt. Was darin den Wasserbauingenieur interessiert, wollen wir der nachfolgenden Zusammenfassung entnehmen.

Willy Zander wurde am 27. Mai 1868 in Berlin geboren. Nachdem er 1887 die Reifeprüfung auf einem Berliner Realgymnasium bestanden hatte, widmete er sich dem Studium des Wasser- und Straßenbauachs an der Technischen Hochschule in Berlin, bestand im Dezember 1891 die erste Hauptprüfung und wurde am 12. Januar 1892 zum Regierungsbautührer ernannt. Als solcher wurde er zunächst beim Neubau der Mühlendamm Schleuse in Berlin, der unter der Leitung des verstorbenen Geheimen Baurats Eger stand, beschäftigt.

Bemerkenswert war hier, daß dem Druckwasser für den Betrieb des hydraulischen Spills als Frostschutz Glycerin zugesetzt wurde, nachdem alle anderen Möglichkeiten, die Druckwasserrohre, die in Kanälen unter Riffblech verlegt waren, gegen Frostschäden zu sichern, hatten aufgegeben werden müssen. Trotz Dichtung der Rohre durch Gummi- und Asbestscheiben trat das Glycerin aus und wurde zur Wiederverwendung in Eimerketten aufgefangen.

Ferner erwähnt Zander, daß an den eisernen Steintoren starke Fußanschlagwulste aus Gummi angebracht worden seien. Sie hätten sich im Dauerbetriebe aber nicht bewährt. Hierzu darf ergänzend gesagt werden, daß ein für solche Zwecke brauchbares vulkanisiertes Gummi erst etwa 40 Jahre später durch den Regierungsbaurat Jehn in Meppen hergestellt worden ist. Es hat eine sehr lange Lebensdauer und ist allen Beanspruchungen gewachsen.

Wesentlich ist auch, daß Zander damals bereits beim Probebetriebe festgestellt hatte, daß die Schützen nur langsam und an der Mühlendamm Schleuse nicht voll geöffnet werden durften, weil sonst Längswellen in der Schleusenammer entstanden, die sowohl den in der Kammer befindlichen Schiffen wie auch den Toren gefährlich werden konnten. Die berechtigten Bestrebungen, diese Längswellen zu vermeiden, haben inzwischen zu vollem Erfolg geführt, wie zahlreiche in den letzten Jahrzehnten dem Verkehr übergebenen Schleusen Neubauten beweisen.

Abgesehen von zwei kleinen gewölbten Brücken aus Klinkermauerwerk im Tiergarten hat Zander noch eine 100 m lange Kaimauer am Kupfergraben gebaut. Bei letzterer bestand der Fuß aus zwei zwischen hölzernen Spundwänden stehenden Grundpfahlreihen, über deren Köpfe eine gute zementreiche Betonschüttung mit Schütttrichter eingebracht wurde. Die Pfähle haben später nachgegeben, so daß etwa 40 Jahre später die Ufermauer umgebaut werden mußte.

Interessant ist auch, was Zander über den Umbau einer Abwassertonrohrleitung im Tiergarten berichtet. Die alte Leitung hatte als Muffenabdichtung einen Tonwulst, der die Wurzeln der Alleebäume stark anzog. Die Wurzeln hatten in den Tonrohren Wurzelknollen gebildet, die das Wasser aufsogen und die Rohrleitung so verstopften, daß nur noch wenig Wasser ablaufen konnte. Bei der Neuverlegung wurden statt der Tonwulste Muffendichtungen aus geteertem Hanf gewählt. Sie waren zwar teurer, aber betriebssicherer. Freilich verloren die Alleebäume ihre Saftquelle und mußten nun wohl häufiger künstlich mit Wasser versorgt werden.

Den Rest seiner praktischen Ausbildungszeit verbrachte Zander beim Baubüro des Stadtbauamts Frankfurt/Oder für den Neubau der Oderstraßenbrücke. Hier ist zu erwähnen, daß die Pfeiler einen Pfahlrost mit Umfassungsspundwänden erhielten, die gegen Unterspülung bei Hochwasser durch Steinschüttung geschützt wurden. Da hierzu ausrangierte Pflastersteine verwendet wurden, die sich für diesen Zweck wegen ihrer geringen Größe wenig eigneten, wurde ein Pfeiler beim ersten Hochwasser so tief freigespült, daß die Spundwand fast völlig frei wurde. Später soll die betreffende Pfeilergruppe auf Senkkästen neu gegründet sein. Uebrigens wurde bei diesem Bau beobachtet, daß die Pfähle abwechselnd leicht und schwer zogen. Dieses ungleichmäßige Ziehen war darauf zurückzuführen, daß im Untergrund Sand- und Tonschichten miteinander abwechselten. Zander beteiligte sich am Schinkelwettbewerb. Seine Arbeit wurde als Prüfungsarbeit angenommen. Dieser Erfolg brachte ihm eine Zeitersparnis von 11 Monaten ein. Am 29. Juni 1895 legte er seine zweite, die große Staatsprüfung ab. Als Regierungsbaumeister trat er sofort bei der preußischen Wasserbauverwaltung ein und wurde am 17. 7. 1895 der Hafenbauinspektion Swinemünde überwiesen.

In Swinemünde von Juli 1895 bis Juni 1897.

Hier hatte Zander u. a. den Bau von Uferdeckwerken am Leuchtturm Großhorst am Fuße einer etwa 50 m hohen Lösslehmwand und am Fuße des Streckelberges, einer etwa 40 m hohen Sanddüne mit der Fußbake, im Eigenbetriebe zu leiten. An den Entwürfen mißfiel ihm die etwa 30 cm starke Betonunterlage am Streckelberg mit ihrer etwa 25 cm hohen Stachelabpflasterung aus Granitsteinen, die er für zu schwach hielt. Der Bau erfolgte aber entwurfsgemäß, weil die von Zander für notwendig erachtete Aenderung zu teuer geworden wäre. Er schreibt darüber, das Deckwerk habe nach rd. 45jährigem Bestande erneuert werden müssen, da es — vermutlich infolge der schwachen Unterdecke — brüchig geworden sei. Auch das 25 cm hohe stachel-förmige Granitsteinpflaster sei an sich geeignet, die auflaufende Brandung zu zerreißen, eine größere Höhe sei aber wirksamer. In diesem Falle sei versucht worden, das Hinterschlagen der Mauerkrone durch auflaufende Wellen oder Spritzer durch eine dichte Ginsterhecke, die in einem Lehmbedt angelegt wurde, zu mildern. Diese Maßnahme habe den gewünschten Erfolg gehabt, aber hohe Unterhaltungskosten verursacht.

Bei Großhorst wurde eine stehende Mauer im Abstände von etwa 4 m vom Böschungsfuß des Berghanges ausgeführt. Der Betonkern erhielt ein Mischungsverhältnis von etwa 1 : 5 und 1 : 6. Die Mauer sollte ursprünglich mit Zyklopenmauerwerk verblendet werden. Ausgeführt wurde jedoch schichtenförmige Granitverblendung mit durchgehenden Lagerfugen in 25 bis 40 cm Schicht-höhe, da geeignete Maurer für das Zyklopenmauerwerk nicht vorhanden waren. Gegen diese Ausführung bestand damals eine gewisse Abneigung, einmal weil das Aussehen zu weich war, dann aber auch deshalb, weil es angeblich kostspieliger war als Zyklopenverblendung. Ander-seits läßt sich das Bruchsteinmauerwerk leichter mit dem Beton des Mauerkerne verbinden, auch wird das Zwickeln vermieden, worauf Zander besonderen Wert legte. Nach Zanders Ansicht hat sich diese Bauart bewährt. Die Mauer diente dann als Vorbild für die Verlängerung des liegenden Deckwerks am Streckelberg und hat auch dort keinen Anlaß zur Beanstandung ge-gaben. Als hier später bei einer Sturmflut die Mauer völlig über- und hinterschlagen wurde, entstand zwar eine Mulde in der Hinterfüllung, in der ein vierspänniger Wagen bequem hätte wenden können. Die Mauer war aber unversehrt, und die Wiederherstellungsarbeiten beschränkten sich auf die neue Hinterfüllung.

Zander bezeichnet es als unbedingt erforderlich, daß die lotrechten Mauern eine gute Sicherung gegen Freispülen des Fußes erhalten. Auch das liegende Deckwerk am Streckelberg (Neigung 45°) habe eine 2,5 bis 3,0 m lange Spundwand erhalten, die ihrerseits durch Steinschüttung und Buhnen aus zwei Reihen von Rundpfählen gesichert wurden; der Raum zwischen den beiden Pfahl-reihen wurde durch Steinpackung auf Faschinen ausgefüllt. Für ebenso notwendig hält Zander eine ausreichende Entwässerung der Hinterfüllung durch den Fuß der Mauer, damit das auf-schlagende Wasser leicht ablaufen kann. Bei Großhorst wurden Drainrohre in der Mauer über der Spundwand verlegt. Sie müssen aber gegen Versandung geschützt werden, z. B. durch einen Schüttkegel aus grobem Kies am landseitigen Ende. Ferner empfiehlt sich die Anbringung eines siebartigen Kupferblechs am seeseitigen Ende gegen das Eindringen von Sand und Unge-ziefer.

Ueberhaupt empfiehlt Zander, bei Seebauten nicht allzu sparsam zu bauen. Ersparnisse werden fast immer durch hohe Unterhaltungs- und Ausbesserungskosten bei der Beseitigung von Sturm-schäden mehr als ausgeglichen.

Wegen seiner Eigenart soll folgender von Zander erzählter Vorfall erwähnt werden. Im Keller des großen Leuchtturms bei Osternothafen sollte eine aus 5 eisernen zylindrischen Behältern be-stehende Siloanlage für die Aufspeicherung von Leuchtturmöl aufgestellt werden, die von außen her aus den Oelfässern direkt aufgefüllt werden konnte. Die Behälter waren aber so groß, daß sie nur durch segmentartiges Ausstemmen des Mauerwerks in den Keller geschafft werden konnten. Offenbar war die Bestellung nicht der Größe der Türöffnungen angepaßt worden.

In Swinemünde hat Zander vier Sturmfluten erlebt, die an den Dünen des Bezirks erhebliche Be-schädigungen, aber keinen Durchbruch verursacht haben. Die Strandhaferpflanzungen bilden mit ihren fast bis zum Grundwasserstand reichenden Wurzeln eine dichte, herabhängende Matte und geben der fast lotrecht abgeschlagenen Düne infolge ihrer pendelnden Nachgiebigkeit einen guten Schutz. Die Sturmflut in der Ostsee erhöht gewöhnlich den Wasserstand um 1,0 bis 2,0 m. Die auflaufenden Wellen sind jedoch am Strande erheblich höher.

Zander erwähnt auch die Deiche, die seinerzeit in Ermangelung eines besseren Deichbaubodens aus stark sandhaltigem Material hergestellt und mit einer dünnen Mutterbodenschicht mit aufge-legten Rasenplaggen abgedeckt sind. Ein solcher Damm ist z. B. der Damerower Seedeich (nördlich von Heringsdorf), der im Anschluß an die schwere Sturmflut von 1873 erbaut wurde. Bei langandauernder Dürre mit Sonnenbrand können die Rasenplaggen nicht die erforderliche Feuchtigkeit und Nahrung aus dem sandhaltigen Boden erhalten und müssen verdorren, obwohl die Deiche von Schafen beweidet und mit neuem Grassamen wiederholt besamt werden. In feuchten Sommern sind die Deiche gut begrünt. Solche Deiche sind daher dauernd Sorgenkinder der Wasserbauverwaltung.

Verlegung der Dievenow-Mündung von Juli 1897 bis März 1899.

Nach kurzer Beschäftigung als Hilfsarbeiter des damaligen Regierungs- und Baurats Eich bei der Regierung Stettin, wurde Zander am 1. Mai 1898 mit der Verlegung der Dievenow-Mündung beauftragt.

Dort war ein etwa 30 m breiter Durchstich mit dem Halbmesser von 300 m durch Baggerung herzustellen, dazu eine etwa 125 m lange Westmole und eine kurze Ostmole zu errichten. Die alte Dievenow wurde durch einen Damm (Coupiierung) aus Sinkstücken mit einem Flügeldrich aus Sandschüttung abgesperrt. Zander ließ zunächst die etwa 3 m breiten Bankette hinter der Steinschüttung des Durchstiches und über der Uferböschung mit einer Steinschüttung abdecken. Diese Bauart wurde aber aus Sparsamkeitsrücksichten aufgegeben und statt dessen eine Kies-schüttung auf dünner Lehmdecke gewählt, die sich an anderer Stelle, allerdings bei wesentlich anderen Verhältnissen, als ausreichend erwiesen hatte. Einige Zeit später wurde der mit Kies abgedeckte Teil des Banketts durch eine Sturmflut fortgeschlagen und die darüberstehende gepflasterte Böschung zerstört. Der untere, bis zur Durchstichsohle reichende Teil der Böschungsfläche blieb dabei unbeschädigt, wahrscheinlich deshalb, weil sie aus zwei übereinander liegenden Sinkstücken bestand.

Bei der Wiederherstellung dieser Schäden erfolgte die Abdeckung der Bankette im oberen Teil mit gebrochenen Steinen auf einer 10 bis 15 cm starken Betonplatte, im unteren Teil auf ebenso starker Seekieslage. Teilweise, besonders hinter der Molenwurzel, wurde das obere Bankett mit kleineren Bruchsteinen in Zementmörtel gedeckt. Der landseitige Rand des oberen Banketts wurde durch eine etwa 50 cm hohe und i. M. 30 cm breite Herdmauer aus Granitbruchsteinen gegen Hinterschlagen durch auflaufende Wellen geschützt. Alle Bauteile wurden sofort nach der Fertigstellung mit trockenen Zementsäcken und einer darüber liegenden Sandschicht von mindestens 50 cm Stärke gegen jede Frosteinwirkung geschützt.

Die so ausgeführten Arbeiten lieferten ein gutes Ersatzwerk, die neu hergestellten Bankette widerstanden einwandfrei den Angriffen der nachfolgenden Sturmfluten.

Bei dieser Gelegenheit hat sich erwiesen, daß gebrochene Steine dem Wellenschlag mehr Widerstand leisten als runde, erheblich größere Schüttsteine. Sie verkitten sich mit ihren rauen Bruchflächen erheblich besser als glattwandige Steine, die freigespült und alsdann vom Wellenschlag abgerollt werden.

Als diese Schäden ausgebessert werden sollten, trat Frost ein. Trotzdem mußten die Arbeiten beschleunigt durchgeführt werden, damit bei einem etwa aufkommenden neuen Unwetter keine weiteren Schäden eintraten. Da die in der Umgegend wohnenden Arbeiter nicht ausreichten, wurden weitgehend Frauen und Mädchen herangezogen; die älteren mußten die zur Vermauerung der Bruchstellen erforderlichen Ziegel und Mörtelstoffe am Feuer erwärmen und das Essen kochen, um die Pausen zu verkürzen. Die Mädchen wurden beim Be- und Entladen beschäftigt. Die im Eigenbetriebe ausgeführten Arbeiten gingen auf diese Weise schnell voran und wurden in kürzester Frist mit bestem Erfolg erledigt.

Erwähnenswert ist noch ein Absperrdeich, der das von außen durch die noch nicht gänzlich versandete alte Dievenow-Mündung eindringende Hochwasser vor dem Eintritt in die Dievenow abhalten und auf die dahinter liegenden Wiesen abweisen sollte. Da ein brauchbarer Deichboden nicht vorhanden war, wurde der Deichkern aus Sand aufgespült und dann profilgemäß eingebaut. Die Spüldämme bestanden aus Faschinen. Der fertige Sandkern wurde mit einer etwa 10 cm starken, gut gestampften Lehmschicht abgedeckt. Vor den beiden Dammböschungen wurden 30 cm breite und 8 cm starke Rasenplaggen horizontal verlegt, deren treppenartige Außenkanten in der Böschungsneigung glatt geschnitten wurden. Die Deichkrone erhielt als Abdeckung zwei horizontale Rasenplaggenlagen. Dieser so gebaute Deich ist nicht gesackt, wie durch mehrfache Nivellierung später festgestellt wurde. Der ganze Deich zeigte bald eine gute Begrünung. Das Einschlagen von Ankern jeder Art in den Deich war streng verboten.

Der Damm (Coupiierung) zur Absperrung der alten Dievenow, stromab des neuen Durchstiches, ist aus 1 m starken Sinkstücken hergestellt, deren Länge und Breite den örtlichen Verhältnissen angepaßt wurden. Bis zur endgültigen Fertigstellung des neuen Durchstiches wurde in dem Damm eine Lücke zur Ableitung des Dievenow-Wassers offen gehalten. Da hier naturgemäß eine starke Strömung herrschte, so war das Einfahren und Verbauen der Schlußsinkstücke erheblich erschwert und gefährdet. Um nach Fertigstellung des Durchstiches die Lücke im Damm tunlichst schnell und möglichst gefahrlos für die Arbeiter zu schließen, wurde ein Pumpenbagger vor die Lücke gelegt und letztere allmählich durch schlaff mit Sand gefüllte Säcke, die durch den harten Strom in die Lücke hineingezogen und durch angebundene Drähte in einer vorher ermittelten Entfernung von dem Bagger festgehalten wurden, geschlossen. Sobald eine Lage Säcke in voller Breite der Dammücke verlegt war, wurde sie von dem stromauf liegenden Bagger hinterpült und die nächste Sandsacklage auf dieselbe Weise eingebaut. Sobald die Säcke über Wasser kamen, wurde die Strömung durch stromauf des Dammes eingespülten Sand abgeschnitten. Jetzt konnte der Damm bequem bis zur Sollhöhe fertiggestellt werden. Eine weitere Ueberströmung war ausgeschlossen, so daß für die Dievenow nunmehr nur noch der Weg durch den neuen Durchstich übrigblieb. Hier entstand übrigens bei einer Sturmflut der erhebliche Einstrom von rd. 3,5 m/sek. Ein mit 4 Mann besetztes Ruderboot konnte gegen eine solche Strömung nicht vorankommen.

Stolpmünde von April 1899 bis März 1903.

In Stolpmünde, wohin Zander nach Vollendung der Bauarbeiten an der Dievenowmündung am 1. 4. 1899 versetzt wurde, hatte er den Umbau und die Verlängerung der beiden Hafenmolen sowie den Bau zweier Kaimauern im Hafenbecken zu leiten. Ferner waren die Dünen auszubauen und in den Jahren 1901/02 die Lupow-Mündung festzulegen, eine neue Westmole herzustellen und die fertiggerammte Ostmole vor der Lebamündung zu übermauern. Die Bauleitung für alle diese Arbeiten, der Zander vorstand, befand sich in Stolpmünde.

Die Molenbauten in Stolpmünde boten viele Neuheiten. So war für die Verlängerung beider Molen die Verwendung von eisernen Caissons nach dem Vorbild des Hafenbaues in Heyst vorgesehen und nach einer Studienreise dorthin ein Entwurf aufgestellt. Das Ergebnis war, daß wegen der Schwierigkeiten bei der Herstellung und dem Absenken nur die beiden Molenköpfe aus eisernen Caissons hergestellt werden sollten. Die Caissons besaßen keinen Boden und wurden von zwei eisernen, wasserdichten, eingehakten Schwimmern getragen. Sie waren 9,0 m hoch, 10,0 m breit und im Scheitelpunkt des halbkreisförmigen Kopfes 15,0 m lang, sie waren mit einer mittleren Längs- und zwei Querversteifungen aus Gitterwerk mit Winkeleisen und Rundeisendiagonalen versehen. Die Blechhaut war 7 mm stark. Die 2,2 m breiten und 2,4 m hohen Schwimmblasen waren 13,8 m lang und mit einer 7 mm starken Haut gedichtet. Die abgesenkten Caissons waren gegen eine nach dem Absenken auftretende Sogwirkung der an dem Molenkopf auf- und niedergehenden Wellen durch Ausbreiten von 2 m breiten Segeltuchstreifen geschützt, die im Innern mit 16 mm starkem und am Caissonfußring (126) drehbar befestigten Rundeisen nach dem Absenken von Tauchern ausgebreitet wurden. Alle Vorversuche wurden an einem Modell 1 : 20 durchgeführt. Beide Caissons wurden nacheinander auf einem hölzernen Gerüst im Bauhafen hergestellt. Die durch ein innen liegendes Winkeleisen verstärkte Oberkante des abgesenkten Caissons lag 30 cm über dem ord. Seespiegel. Da zwischen den Molenköpfen später eine Wassertiefe von 6 m gehalten werden sollte, wurde vor dem Absenken des Caissons eine genügend tiefe Baugrube, deren Oberrand etwa 5 m vor dem gerammten Molenkörper lag, ausgebagert und in diese der Caisson hineingestellt. Vgl. hierzu: Zander, Zeitschrift für Bauwesen 1902.

Nach dem Bauprogramm sollte zuerst die Ostmole um rd. 127 m verlängert und fertiggestellt werden. Demgemäß wurde auch der Caisson vor der Ostmole am 13. Juni 1900 und vor der nach Osten leicht gekrümmten, um 142,5 m verlängerten Westmole erst am 15. Mai 1901 abgesenkt. Zwischen beiden Molenköpfen sollte ein rd. 41,5 m breites Fahrwasser von 6,0 m Tiefe vorhanden sein. Bei dem Absenken des Westmolencaissons setzte sich allen durch Versuche begründeten Erwartungen zuwider der Caisson mit der hinteren Breitseite zuerst auf Grund, gleichzeitig hakte der Schwimmkasten auf der rechten (Hafen-) Seite aus, da er infolge eines Versehens der Bedienungsmannschaft durch den auf Grund gefallenen Luftschlauch voll lief, während sonst seine Auffüllung durch das Öffnen zweier Bodenventile vom Caisson aus erfolgte. Das Lenzen des abgesackten und das Wiedereinhaken des gehobenen Schwimmkastens wäre in dem schief abgesackten Caisson nur unter großem Zeitaufwand und dann auch noch mit zweifelhaftem Erfolg ausführbar gewesen. Da der Abstand zwischen beiden Kopfcaissons rd. 42,0 m, also mehr als notwendig, betrug, wurde die Vorderkante des schief abgesackten Caissons durch die Ankerwinde eines Schleppers langsam heruntergezogen, während gleichzeitig das hintere Caissonende durch einen angehängten Baggerprahm festgehalten wurde.

Nach ihrer Aufstellung wurden die Caissons mit feuchten, mit Beton im Mischungsverhältnis 1 : 6 angefüllten Säcken ausgefüllt. Hierzu wurden bei dem einen Caisson rd. 19 000, beim anderen rd. 21 200 Betonsäcke verbraucht. Um die Arbeit möglichst zu beschleunigen, ließ Zander den Bedarf für einen Caisson trocken mischen und nach Verfüllung in den Säcken (rd. 21 000 Stück) auf Vorrat lagern. Dabei wurde auf sorgfältiges, glattes Zunähen der Sacköffnung Wert gelegt. Eine solche Maßnahme erschien zweckmäßig, weil bei dem Versenken der zugebundenen Betonsäcke in der Sackschüttung Räume verbleiben konnten, die nur von den genähten Wulsten ausgefüllt gewesen wären, und weil das sorgfältige Zunähen während des Tag und Nacht ununterbrochen durchgeführten Abwerfens der Säcke in den Caisson zeitraubend gewesen wäre. Die Mischung fand nur bei trockenem Wetter statt. Die Lagerung erfolgte in 18 bis 20 Sackschichten übereinander. Eine Nachprüfung ergab, daß zwar der Beton unter dem Druck stark zusammengepreßt wurde, aber nicht abband. Um ganz sicher zu gehen, ließ Zander einige Säcke nach längerer Lagerung und zwar nachdem er sich davon überzeugt hatte, daß der Beton nicht abgeunden hatte, probeweise in Seewasser versenken. Als sie nach einiger Zeit hervorgeholt wurden, zeigte sich, daß der Beton einwandfrei abgeunden hatte. Hiernach schien die gewählte Ausführungsweise unbedenklich zu sein. Dennoch wurde sie aufgegeben. In der Folge wurde in der Weise verfahren, daß die Säcke während der Einbringung mit Beton ausgefüllt, zugenäht und in den Caissons versenkt wurden. Die Arbeit am Caisson dauerte wesentlich länger als bei der zuerst geschilderten Ausführungsweise. Wahrscheinlich waren auch die Kosten höher. Zweifellos aber bestand eine größere Sicherheit für die einwandfreie Durchführung der Arbeiten, da der Einfluß von Regenwetter und Luftfeuchtigkeit auf den Beton auch bei längerer Bauzeit vermieden war. Der noch unverbrauchte

Vorrat an gefüllten Säcken wurde hierbei verwendet, vorsichtshalber aber erst nach Beifügung von weiterem Zement.

Im fertig angefüllten Caisson vor der Westmole wurden Schürflöcher von etwa 2 m Tiefe hergestellt und auch zwei Wülste freigelegt. Bei der Besichtigung derselben ergab sich, daß sowohl die zuerst als auch die im späteren Verfahren eingebrachten Säcke gut abgebunden hatten. Beide Verfahren hatten also ihre Berechtigung. Nach Zanders Ansicht hätten sich die durch den weiteren Zementzusatz verursachten Kosten sparen lassen. Die Schürflöcher waren im übrigen so wasserdicht, daß nur wenig gelenzt werden brauchte, und Zander in Ruhe Lichtbilder von den Innenwandungen des Caissons aufnehmen konnte.

Der gesamte Molenbau wurde, abgesehen von den beiden eisernen Caissons und den beiden Schwimmblasen, die später verkauft wurden, im Eigenbetriebe ausgeführt.

Zander bezeichnet die Vorwegnahme der Ostmole bei der Ausführung vor der Westmole als falsch, da hierbei beide Molenverlängerungen dem Einfluß des vorherrschenden Seeganges von Westen her ausgesetzt waren. Die Ausführung wäre reibungsloser verlaufen, wenn zuerst die Westmole und dann erst unter ihrem Schutz die Ostmole verlängert worden wäre.

Die Molenkörper bestehen aus je zwei geramnten und 1:1/4 gegeneinander geneigten Pfahlreihen mit rd. 2,5 m voneinander entfernten Rammjochen. Die Jochbalken (Vierkanthölzer) haben drei lotrechte Tragpfähle und an jedem Ende je 2 angeblattete und angebolzte Schrägpfähle (1:1/4 geneigt). Zum Schlagen der drei senkrechten Jochpfähle wurden Pionierrammen (Handrammen mit 20 bis 24 Bedienungsmännern) und bei ruhigem Wetter auch eine schwimmende Dampfamme benutzt. Das Schlagen der schrägen Wandpfähle führten zwei auf dem Molenkörper auf Gleisen fahrende Dampfrahmen aus, die bei schlechtem Wetter auf den alten Molen standen und dort durch ausgespannte Drahtseile zum Schutz gegen Wellenschlag festgezurrt wurden. Zum Schlagen der Wandpfähle wurden bei ruhigem Wetter zuweilen auch eine bis zwei schwimmende Dampfrahmen benutzt. Es konnten also zwei fahrende Dampfrahmen, zwei bis drei Schwimmrammen und eine Pionierramme bei ruhigem Wetter, das zuweilen mehrere Tage anhält, in Tätigkeit sein. Für alle Bedürfnisse der Rammen angespitzte Pfähle auf Vorrat zu legen, war wegen Zimmermannsmangel nicht immer möglich. Zuweilen mußten deshalb auch ungespitzte Pfähle unter Verwendung von Spülwasser geschlagen werden. Diese Pfähle hatten aber den Nachteil, daß die bei jedem Pfahl schon durch leichten Seegang auftretende pendelnde Bewegung ein allmähliches Hochwuchten und schließlich das Herausspringen des Pfahles veranlaßte. Dieses Verhalten wurde bei angespitzten Pfählen nicht beobachtet. Standen nun solche unangespitzten Pfähle zwischen den beiden aus Halbhölzern (Durchmesser i. M. 25 bis 30 cm) bestehenden und an den schrägen Jochpfählen angebolzten, provisorischen Rammzwingen, dann wurden sie nach Beendigung der Rammung zur Verhinderung des Hin- und Herpendelns bei Wellenschlag durch einen etwa 10 cm langen Drahtnagel an einer Rammzwinde befestigt. Diese leichte Annullung genügte vollkommen. Freistehende Pfähle ohne Spitze, zum Beispiel lotrechte Jochpfähle, wurden dadurch am Pendeln gehindert, daß sie mit Drahtseilen an benachbarten Wandpfählen befestigt wurden. Im übrigen wurden bei starkem Seegang Schlenkerbewegungen in den fertig geramnten Molenstrecken zwischen beiden Molenpahlwänden im Zickzack erheblich herabgesetzt. Hierdurch wurden beide Pahlwände zum gleichzeitigen Abwehren des Wellenstoßes herangezogen, wobei die Gurthölzer der Zwischenjoche mithalfen.

Bei den alten Molen in Stolpmünde wurden die provisorischen Rammzwingen (Halbhölzer) durch vierkantige, in die Wandpfähle eingelassene Vollhölzer (Gurthölzer) von rd. 30 cm Breite ersetzt. Durch die Gurthölzer wurden die Molenanker von rd. 50 mm Durchmesser hindurchgezogen und die vorstehenden Ankerköpfe durch je zwei hölzerne Knaggen geschützt. Diese Knaggen hatten auch den Zweck, an der Mole entlangleitende Fahrzeuge vor den vorstehenden Ankerköpfen zu schützen. Gurtholz und Knaggen boten aber den an der Mole auf- und niedergehenden Wellen einen erheblichen Widerstand, der eine dauernde Ausbesserungsarbeit veranlaßte. Die hölzernen Gurthölzer wurden deshalb bei den Molenverlängerungen durch ausgerichtete eiserne Längsschwellen der Eisenbahnverwaltung, die hochkant in die Wandpfähle eingelassen wurden und nur wenig vorstanden, ersetzt. Nach etwa 30jährigem Bestand wurden auch die eisernen Schwellen abgängig. Sie sollen, wie Zander angibt, durch U-Eisen ersetzt worden sein. Zander empfiehlt, Eisenteile in angewärmtem Zustande mit heißem Teer zu streichen, der nach seinen Erfahrungen der Einwirkung des Seewassers am längsten widersteht, vorher aber das Eisen — am besten mit dem Sandstrahlgebläse — gründlich zu entrostet und mit einem Grundanstrich aus Bleimennige zu versehen.

Die alten Molen hatten eine in ganzer Länge von der Wurzel bis zum Kopf fugenlos durchlaufende Uebermauerung mit Brustmauer aus Granitbruchsteinen. Dieses fugenlose Mauerwerk zeigte zahlreiche wilde Risse, die durch die häufige Verwendung von Zwickern noch begünstigt wurden. Im Innern der alten, augenscheinlich sofort im vollen Querschnitt hergestellten Brustmauer befand sich Fugenmörtel, der augenscheinlich infolge schnelleren Abbindens des äußeren Mörtels von der Sauerstoffzufuhr aus der Luft abgeschnitten worden war. Eine solche Erscheinung war auch bei der Brustmauer anderer Molen früher schon festgestellt worden. Zander ließ deshalb die Brustmauer nicht sofort in ganzer Höhe, sondern in verschiedenen Lagen

treppenartig hochführen. Spätere Untersuchungen ergaben, daß der Fugenmörtel auch im Innern der Brustmauer gut abgebunden war. Zur Vermeidung der wilden Risse im Molenkörper wurden, zum ersten Male bei dem Molenbau, künstliche Fugen von rd. 10 cm Breite im Abstand von etwa 20 m hergestellt. Der Hohlraum wurde mit Kiesbeton 1:8 ausgefüllt und mit Granitbruchsteinen abgedeckt. In Mauerkörpern von rd. 20 m Länge durfte kein Zwicker verwendet werden. Für die binnenseitige Kante des Molenkörpers und für die beiden Kanten der Brustmauer wurden besonders bearbeitete Granitkantensteine verwendet. Das Durchschlagen der Wellen durch die Fugen bei stürmischem Wetter wurde durch eingesetzte Balken verhindert.

Für den Abbruch der alten Molenköpfe (Unterbau aus zwei miteinander verankerten Rundpfahlreihen mit Steinfüllung) hat Zander unter erheblicher Verbilligung der Arbeiten bei gleichzeitiger Beschleunigung der Arbeiten einen Eimerbagger verwendet, dessen Eimer die Pfahlwände und die Steinschüttung schnell wegbaggerten. Die Schüttrinnen und Baggerprähme mußten dabei durch Faschinen gegen Beschädigung durch herabfallende Steine geschützt werden. Trotz des kostspieligen Ersatzes der stark beschädigten Stahlschneiden an den Baggereimern waren die Abbrucharbeiten schneller und billiger auszuführen als mit Tauchern und Pfahlziehern.

Bei den Molenbauten sind auch umfangreiche Versuche mit für Seebauten als besonders geeignet angepriesenen Zementarten gemacht worden, z. B. mit Eisenzement. Dieser zeigte bei den Molenköpfen (1:2½ und 1:3) zunächst hohe Festigkeit. Aber während der regenreichen Zeit oxydierte er und blätterte dann bei Frostwetter ab, nachdem die Haut in der Fugenfläche vorher durch zahlreiche Haarrisse zerbrochen war.

Auf der Seeseite der beiden Molenverlängerungen wurden zum Schutz gegen Auskolkungen rd. 10,0 m breite Sinkstücke von rd. 1,0 m Stärke im Abstand von rd. 5 m von der Molenwand durch Steinbewurf versenkt. Auf den Sinkstücken wurde alsdann Baggersand zur Abdichtung verkippt. Der Raum von rd. 5 m zwischen Sinkstückkante und Pfahlwand wurde mit Senkfaschinen in mehreren Lagen verfüllt und über diese eine starke Lage gesprengter Granitsteine geworfen, die durch Abstürzen großer, bei Rügen gezangter Steine oder Betonblöcke gegen den Wellenangriff geschützt wurden.

Anfang Oktober 1902 erhielt Zander den Auftrag, einen östlich von Lebamündung an der Hoheitsgrenze bei rd. 20 m Wassertiefe infolge Zusammenstoßes abgesackten Dampfer zu sprengen, da er infolge des Havarieschadens gerade bei der Maschinenanlage schwer beschädigt war und infolgedessen nicht mehr gehoben werden konnte. Die beiden Masten aus Pitchpine ragten aus dem Wasser und bildeten eine gut sichtbare Bezeichnung der Liegestelle. Grüne Wrackleuchttönen waren gleich nach dem Unfall ausgelegt worden. Anfang Oktober war für die Ausführung von Sprengarbeiten auf hoher See schon reichlich spät, da bereits Ende September auf der Ostsee das stürmische Wetter einsetzt. Trotzdem begann Zander sofort die Sprengarbeiten mit Hilfe von drei erprobten, tüchtigen Tauchern, die bei der Staatsbauverwaltung schon seit Jahren im Seegebiet tätig waren. Ein Taucher sollte auf die Klarhaltung der Leinen und Luftschläuche aller drei Taucher dauernd Obacht geben und ein Taucher nur in Begleitung eines zweiten Tauchers am Wrack arbeiten. Die Sprengdosen enthielten 20, 30 oder 50 Pfund altes Säulenpulver mit einem Knäuel Schießbaumwolle, in den eine Knallquecksilberpatrone eingelegt war. Die Dose bestand aus gelötetem, starkem Weißblech. Zur Erhöhung der Sprengwirkung war sie mit starkem Schiemannsgarn umwickelt, das einen Teer-Asphalt-Anstrich erhielt. Alle Stoßstellen und das Mündungsstück im Deckel wurden mit flüssigem Paraffin abgestrichen bzw. gefüllt. Die Entzündung erfolgte mit einem Funkapparat, wobei 5 Dosen gleichzeitig zur Explosion gebracht werden konnten. Die Sprengwirkung war wider Erwarten gut und kräftig. Das Wetter blieb auffallend lange Zeit ruhig, so daß der Schornstein und die Deckaufbauten nebst Deckladung fortgesprengt oder abgeräumt werden konnten. Gleichzeitig bargen die drei Taucher die Schiffskasse sowie einen Teil der Ladung und der Schiffsausrüstung. Die beiden Masten aus Pitchpine waren von den Tauchern kurz über Deck angesägt worden und wurden von zwei Dampfern mit Hilfe von Stahltrossen abgebrochen. Nach jeder Explosion trieben Dorsche und andere Fische, zuweilen auch mittelgroße Lachse, Kieloben mit geplatzter Luftblase auf der Wasseroberfläche, wo sie von der in Booten befindlichen Schiffsbesatzung sorgfältig aufgekötscht wurden. Der Erlös der geborgenen Werte deckte nicht die Kosten der Sprengung. Die Sprengarbeiten wurden ohne jeden Unfall durchgeführt. Uebrigens kam einige Tage nach Beendigung der Sprengarbeiten stürmisches Wetter auf, das auf das aufgesprengte, rd. 20 m tief liegende Wrack so stark einwirkte, daß die im Schiffsraum verladenen und durch den Auftrieb gegen die Deckbalken gedrückten Spundwandbohlen herausgerissen und an Land getrieben wurden, wo die Strandanwohner sie bargen (dröges Strandgaut). Diese Erscheinung gibt auch einen Aufschluß über die Tiefenwirkung der schweren See bei starkem Sturm auf der Ostsee.

Bei den Sprengungen erwies sich die 200 m lange Zündkabelleitung als zu kurz. Bei der Explosion von zwei mittleren Sprengdosen erlitt der in dieser Entfernung von dem Wrack liegende Dampfer eine so starke Erschütterung, daß die Kohlenstücke aus der Bunkertür herausrollten. Der Dampfer wurde dann einige hundert Meter weiter abgelegt. Wenn zwei bis drei große Sprengdosen explodierten, hob sich der Wasserspiegel über dem Wrack um etwa 1 m unter gleichzeitigem Entweichen starker Schwaden von Pulverdämpfen.

Helgoland, April bis November 1903.

Am 1. April 1903 erhielt Zander die Mitteilung, daß er die Bauleitung bei der Herstellung einer 66 m langen Schutzmauerversuchsstrecke auf der Westseite von Helgoland vor Paterken und sin Fru vor dem Leuchtturm zu übernehmen habe. Nach kurzem Aufenthalt in Tönning, wo er die Vorbereitungen für den Bau traf, siedelte er nach Helgoland über. Gegen den höheren Ortes bereits genehmigten Entwurf hatte Zander Bedenken, weil die Oberkante der Mauer nur 1,05 m über Sturmflut liegen sollte. Zander hielt das für zu niedrig und zwar aus folgenden Gründen. Die Mauer sollte einen Anlauf erhalten, der mit dem am oberen Ende vorgesehenen nach vorn geneigten und 0,34 m vorspringenden Mauerkopf ganz den damaligen Erfahrungsergebnissen entsprach. Bei dieser Form wird die angelaufene Welle abgekehrt, sie wirft sich der nächsten Welle entgegen und vernichtet deren Stoßkraft. Zander bezeichnet diese Annahme aber nur als theoretisch richtig, da die Welle nur bei genügender Höhenlage des Mauerkopfes zurückgeworfen werden könne. Bei der vorgesehenen Höhenlage des Mauerkopfes müsse daher die Welle über die Mauer schlagen, ein Vorgang, der durch den Anlauf der Mauerfläche begünstigt werde. Zander schlug deshalb eine Höhe von 2,5 bis 3,0 m über dem höchsten Hochwasserspiegel vor. Er drang hiermit aber nicht durch und erreichte nur, daß er unter Beibehaltung der Höhe drei Versuchsstrecken ausführen durfte, nämlich

1. ein Mauerprofil mit leichtem, aber vom Entwurf abweichenden Anzug und nach vorn geneigtem Kopf, wobei der Außenrand der Deckplatte rd. 34 cm vor dem aufgehenden Mauerkörper vorspringen sollte,
2. ein Mauerprofil 1:1¼ nach hinten geneigt mit wie bei 1. nach vorn gezogenem Kopf und
3. eine in ganzer Höhe vom Fuß ab 1:1¼ nach hinten geneigte Mauer.

Nach der Fertigstellung der Mauer ist beobachtet worden, so erzählt Zander, daß bei allen drei Profilen die Sturmflut unterschiedslos hinüberjagte. Die Mauer war zu niedrig und für ein klares Ergebnis waren die drei Probestrecken zu kurz. Die Mauer selbst hat bei allen Sturmfluten gut widerstanden. Zander hat bei einer Sturmflut an einem an der fertigen Mauer aufgestellten Pegel Wasserwellen bis 2,5 m über Mauerkrone beobachtet. Die über die Mauer schlagende See griff den Fuß der rd. 53 m hohen, aus Bundsandstein mit Natursandschichten bestehenden Felswand trotz der Schutzmauer auch fernerhin an, so daß nach der schweren Sturmflut vom 10. Oktober 1928 eine zweite, 1,5 m hohe Schutzmauer im Abstand von 6 m hinter der ersten Mauer zum Schutz der Abbruchhalde errichtet werden mußte.

Die Ausführung der Versuchsmauer gestaltete sich insofern recht schwierig, als die Baustelle bei jeder Tide von der See überflutet wurde. Es konnte also immer nur bei Ebbe gearbeitet werden. Nach Entfernung des verwitterten Felsens (die Sohle bestand aus hartem Zechstein) und Freilegung der Sohle wurden nach einem Vorschlage des Geh. Baurats Suadcani von der Regierung Schleswig hölzerne Kästen aus gespundeten, gegeneinander versteiften Wänden, die nach Bedarf auseinandergenommen und zusammengesetzt werden konnten, auf den gereinigten Boden gestellt, und in ihnen wurden die Beton- und Maurerarbeiten mit schnellbindendem Zement und reichlichem Zementzusatz ausgeführt. Vor Eintritt des Hochwassers wurde der Kasten mit Segeltuch abgedeckt und durch einen aufgeschraubten Deckel, der mit Steinen und Eisen gegen Auftrieb belastet war, gesichert. Der Holzkasten blieb gewöhnlich 3 bis 4 Tiden stehen. Der Füllbeton wurde mit Maschinen auf dem Oberland unter Verwendung von Süßwasser gemischt und in Kästen mit einem Kran mit 12 m Ausladung zur Verwendungsstelle herabgelassen. Wenn nach einer Tide von einem mit Beton gefüllten Kasten die Abdeckung abgenommen wurde, stiegen umfangreiche Wasserdämpfe auf, die von der im Beton entwickelten Abbindewärme herrührten.

Auf dem Oberland wurden für den aufgehenden Mauerwerkskörper der 4,5 m breiten Betonblöcke kleinere Betonblöcke von 0,75 m Seitenlänge in Würfelform hergestellt, die an zwei gegenüberliegenden Seiten halbkreisförmige Rillen von 5 cm Durchmesser erhielten und so versetzt wurden, daß die Rillen senkrecht standen. Die Blöcke wurden auf eisernen Keilen versetzt. Die Fugen wurden von außen her mit geteertem Hanfgarn ausgestopft und dann mit Zementtraßmörtel ausgegossen, wobei die Blasenbildung durch Nachstoßen mit einem eichenen Holzsechert verhindert wurde. Die lotrechten Rillen hatten den Zweck, die einzelnen Betonblöcke untereinander durch den eingegossenen Mörtel gut zu verbinden.

Die seeseitige Außenwand aller drei Versuchsstrecken bestand am Mauerfuß aus drei übereinander gesetzten Granitwürfelsteinen von 0,75 m Kantenlänge, von denen die unterste Reihe nach Ausfüllung mit Zementmörtel in die Zechsteinsohle etwa 20 bis 30 cm eingelassen war, um ein Vorrutschen der Mauer zu verhindern. Die Fugen wurden ebenso behandelt wie die der Betonblöcke. Ueber dem Granitfuß wurde eine Verblendung mit 40 bis 50 cm langen Basaltsteinen in Traßmörtel versetzt. Der Fugenmörtel wurde mit der Ahle geglättet; das Einbringen von besonderem Fugenmörtel war verboten. Der Zwischenraum zwischen der Hinterfläche der Basaltsäulen und den Betonwürfeln des aufgehenden Mauerwerks, die vor dem Versetzen bei täglicher Anfeuchtung mindestens 6 Wochen alt waren, wurde mit weichem Stampfbeton ausgefüllt. Ueberall wurden die Fugen nach dem Glätten des Fugenmörtels ebenfalls mit geteertem Hanfgarn verstopft, um das Eindringen des Seewassers in den weichen Mörtel bis nach

dessen Abbinden zu verhindern. Bei diesen Arbeiten sind verschiedene, zum Teil patentierte, Einsatzmittel zum Beton, die den Widerstand gegen den Einfluß des Seewassers steigern sollten, ausprobiert worden. Zander hat hierbei aber die Ueberzeugung gewonnen, daß ein Zusatz von Traß oder ein verstärkter Zusatz von möglichst kalkarmem Zement den besten Schutz gegen Seewassereinflüsse bieten. Wie Zander mitteilt, hat sich vor dem Fuß der Schutzmauer durch die nach unten stoßenden Wellen allmählich eine Rille im Zechstein gebildet, die nach 25 Jahren mit Beton ausgefüllt werden mußte. Selbst der Zechstein hat sich hier also nicht als dauernd widerstandsfähig erwiesen.

Für die Bruchsteinarbeiten hatte Zander eine Kolonne italienischer Arbeiter eingestellt, für deren leibliches Wohl die Frau des Führers sorgte. Diese Arbeiter waren sehr gut und auffallend genügsam.

Der damalige Minister der öffentlichen Arbeiten, von Budde, der sich öfter während der Arbeiten auf der Baustelle gezeigt hatte, sandte nach der Beendigung der Arbeiten Zander einen anerkennenden Erlaß, über den sich Zander sehr gefreut hat.

Meppen, November 1903.

Nach der Rückkehr von Helgoland wurde Zander nach Meppen gerufen, wo das Oberhaupt der Schleuse des Dortmund-Ems-Kanals unterspült und eingestürzt war. Für die Wiederherstellung standen nur 14 Tage zur Verfügung. In kürzester Frist standen etwa 500 Arbeiter, größtenteils aus Holland, zur Verfügung. Die Ausführung wurde zum Teil einem Unternehmer übertragen, der über das erforderliche Gerät verfügte, aber in der Einhaltung der übernommenen Verpflichtungen völlig versagte. Die Bauausführung erfolgte daher mit den vom Unternehmer gestellten Geräten im Eigenbetriebe unter Zanders Leitung. Da Zander fast immer Eigenbetriebe durchgeführt hatte, brachte er die nötigen Erfahrungen mit, und es gelang ihm, die Wiederinbetriebnahme der Schleuse zwei Tage vor der Beendigung der ihm gestellten Frist zu erwirken.

Zander baute ein neues Oberhaupt unter gleichzeitiger Versteifung der Schleusenkammer ein, wobei das hölzerne Klapptor des Meppener Trockendocks nach eingehender Ausbesserung verwendet wurde. Ferner wurde der rechte Schleusenumlauf durch Einbau eines Absperrdammes geschlossen, das versackte rechte Oberhaupt durch Aufbringen einer Ausgleichsschicht horizontal gestellt und gegen eine weitere Unterspülung durch eine neue Spundwand gesichert. Hierauf wurde die beschädigte Uferbefestigung (Betonplatten) ausgebessert und die Entfernung der Abschlußdämme aus Erde im Kanal ober- und unterhalb der Schleuse, die zu Beginn der Bauausführung zu deren Schutz hergestellt waren, durchgeführt. Zander wollte diese Dämme kurzerhand durchstechen. Hiergegen wurden aber Bedenken erhoben, weil befürchtet wurde, daß hierbei das in die leere Baugrube stürzende Wasser den Kanalwasserspiegel oberhalb der Baugrube zu schnell und zu stark absenken würde, so daß die in großer Zahl auf Weiterfahrt wartenden Schiffe losgerissen und Havarie durch Zusammenstöße erleiden würden. Deshalb wurden zwei schwimmende Pumpen der Kanalbauverwaltung eingesetzt, die die Baugrube aus dem Oberwasser füllen sollten. Als aber nach 12stündigem Pumpenbetrieb kein merkbarer Erfolg festgestellt werden konnte, ließ man die Bedenken fallen und die Dämme durchstechen. Die befürchteten Folgen zeigten sich nicht¹⁾.

Emden, Juli 1906 bis Juni 1915.

In der nun folgenden Zeit war Zander als Hilfsarbeiter im Ministerium der öffentlichen Arbeiten beschäftigt. Hierzu ist nur zu erwähnen, daß Zander an der Vorbereitung der Wasserbauausstellungen auf den Weltausstellungen in St. Louis und in Mailand beteiligt war, und daß ihm Gelegenheit zu einer vierzehntägigen Studienreise durch Nordamerika geboten wurde. Am 1. Juli 1906 wurde er dann nach Emden versetzt, wo ihm zunächst die Leitung des Bauamtes für die Hafenerweiterung (Anschlag 22,5 Millionen Mark), und dann 1907 auch die Leitung des Wasserbauamtes mit der Verlängerung des Uferschutzwerkes auf Borkum um 1000 m (1 Million Mark) übertragen wurden.

Der Hauptzweck der Hafenerweiterung war die neue Emdener Seeschleuse mit rd. 260 m nutzbarer Länge bei 40 m nutzbarer Breite mit 13 m Wassertiefe über den Drempeeln bei M. H. W. Die Schleuse hat als Verschlüsse zwei Schiebetore von 7,15 m Breite und 42,0 m Länge mit Schwimmkasten und je 2 Paar Laufrädern auf jeder Seite, außerdem zwei betriebsfertige Reservetore. Der Antrieb erfolgte mit einer elektrisch angetriebenen Lokomotive. Die Schleuse ist im Schutze eines 1906 fertiggestellten Seedeiches von rd. 4,5 km Länge mit Hilfe einer Absenkung des Grundwassers um 20,0 m unter M. H. W. in vier Staffeln erbaut worden. Mit dem Bau des Deiches waren der Bau eines Sieles mit 10 m breiter Durchfahrtsöffnung und eines Sielwärterhauses verbunden.

¹⁾ Vgl. Zander, Zentralblatt der Bauverwaltung 1903.

Bei den Vorarbeiten war die Ausführung des Schleusenbaues aus einzelnen 1 m starken Betonplatten, die nach der Wilhelmshavener Bauweise mit Hilfe einer Taucherglocke hergestellt werden sollten, dann auch mit massiven Häuptern und massiven Kammermauern auf Pfahlrost (nutzbare Länge aber nur 165 m, bei nutzbarer Breite von 30 m und Tiefe von 10 m) erwogen worden. Es wurden auch eingehende Versuche mit Anwendung des Gefrierverfahrens zur Trockenlegung der Baugrube angestellt, und zwar in einer eigenen Gefrierversuchsanstalt. Für den Schleusenbau wurden auch jahrelange Versuche zur Ermittlung des besten Betonmischungsverhältnisses, auch unter Zusatz von Traß, angestellt¹⁾. Für die Schleuse wurde eine Mischung: 1 Teil Zement + 0,5 Teile Traß + 3 Teile Sand und 10 Teile Kies in Aussicht genommen. Einige Tage nach dem Beginn der Betonierungsarbeiten entschloß sich Zander jedoch nach einer Besichtigung der fertigen Mischung den Kieszusatz von 10 auf 9 Teile herabzusetzen. Die hierdurch erzielte Verbesserung des Betons war erheblich, die Mehrkosten blieben in vertretbaren Grenzen. Die neue Mischung wurde daher für den gesamten Schleusenbau beibehalten.

Nach mehrfachen Versuchen und Besichtigungen wurde beschlossen, die ganze Seeschleuse mit Hilfe einer Grundwasserabsenkung auszuführen. Die Absenkung ging wunsch- und erwartungsgemäß vor sich, nur an der Nordostecke der Baugrube wollte wegen einer hier liegenden, wahrscheinlich bis zur Ems reichenden, etwa 0,3 bis 0,5 m starken Geröllschicht das Grundwasser in der untersten Haltung trotz vielseitiger Bemühungen nicht weichen. Als dann aber eine in einer Vertiefung der Baugrube aufgestellte weitere Pumpe eingriff, sank wider Erwarten das Grundwasser in wenigen Stunden tief genug ab. Man hatte damit gerechnet, daß dieser Zustand erst in etwa 3 bis 4 Wochen eintreten würde. Da die Grundwasserabsenkung täglich 3000 M kostete, entschloß sich Zander, sogleich mit dem Bau zu beginnen, obwohl der Entwurf für die Schleuse noch nicht genehmigt war. Er war aber fertig und wurde nach nochmaliger Durchsicht abgesandt. Die Genehmigung erfolgte in kurzer Frist. Die Prüfung hatte keine Beanstandungen von Bedeutung ergeben.

Während Zander 1909 und 1910 für die Vorversuche für den Schleusenbau elektrischen Strom aus zwei vorhandenen Zentralen und mit Hilfe von verschiedenen am Binnenhafen aufgestellten Lokomobilen beschafft hatte (Preis 12 bis 12½ Pfg./kWh), errichtete er für die Schleuse und die elektrisch betriebene Grundwasserabsenkung eine Umformerstation hinter der Staatswerft zum Umformen des von der Wiesmoor-Zentrale unter Verwendung des Wiesmoortorfes erzeugten elektrischen Stromes. Die Fertigstellung der Stromzuteilung wurde aber durch Verschulden der Wiesmoor-Zentrale verzögert, so daß der teure Strom aus der provisorischen inzwischen noch erheblich vergrößerten Lokomobilzentrale weiter bezogen werden mußte. Den Schaden von 30 000 M mußte die Zentrale auf Grund eines Schiedsgerichtsspruches zahlen. Die Stromlieferung für den Schleusenbau Emden hat aber die Wiesmoor-Zentrale über ihre anfänglichen Schwierigkeiten hinweggebracht. Der Strombedarf betrug für die drei Baujahre mindestens 3,5 Mill. kWh. Außerdem schlossen sich die Stadt Emden und die Staatswerft nach Beendigung des Schleusenbaus an. Dadurch konnte ein niedriger Staffelpreis für alle Teilnehmer erzielt werden.

Während der Ausschachtung der Schleusenbaugrube, die im Schutze der Grundwassersenkung ausgeführt wurde, ergab sich eine unliebsame Überraschung. Im äußersten Drittel der Südkammerwand fand sich eine 3,0 m breite und etwa 1,5 m starke Farrenerde-Linse, die bei den Bohrungen zur Untergrunduntersuchung bisher nicht bemerkt worden war. Die Linse mußte unter der Schleusenmauer auf jeden Fall in voller Tiefe beseitigt werden. Zu diesem Zweck wurde noch eine fünfte kurze Haltung eingebaut. Dazu mußte der Fuß der i. M. 1: geneigten Böschung um 1,5 m gesenkt werden. Die hierin liegende Gefahr hätte beseitigt werden können, wenn es möglich gewesen wäre, die Böschung in ganzer Höhe parallel zu sich selbst zu verschieben. Diese Maßnahme hätte aber den Umbau der vier auf den Böschungen liegenden Grundwasserhaltungen zur Voraussetzung gehabt. Hiermit wäre aber neben den hohen Kosten ein großer Zeitverlust verbunden gewesen. Um dennoch zum Ziele zu gelangen, wurde der Böschungsfuß zurückgelegt und die Böschung selbst entsprechend steiler angelegt, die Baugrube für die Fundamentvergrößerung wurde unter dem Böschungsfuß teilweise ausgesteift, die Böschung oberhalb etwas abgetragen. Zum Schutz der Arbeiter wurden Wachleute mit Signalphörnern aufgestellt, außerdem mußte ein Bauaufseher stündlich die Böschung abschreiten. Als das tiefer geführte Fundamentstück fertiggestellt war, rutschte plötzlich der steilere Böschungsteil ab, zerstörte teilweise die Grundwassersenkungsanlagen und verschüttete den tiefer gegründeten Fundamentteil. Während dieser Vorgänge wurde die Kammermauer weitergeführt, so daß der Unternehmer nicht geschädigt wurde. Der später hochgeführte Kammermauerteil wurde durch eingelegte alte Eisenbahnschienen mit den vorher fertiggestellten Wandteilen fest verbunden. Durch diese Maßnahmen wurden etwa 30 000 M gespart und außerdem ein Zeitgewinn erzielt.

Anfang Januar 1912 hatte Zander den Entwurf für die Herstellung eines Verbindungskanals vom neuen großen Hafenbecken nach dem zu vertiefenden Dortmund—Ems-Kanal unter der vor der Vollendung stehenden großen Drehbrücke eingereicht. Als die Genehmigung längere Zeit

1) Vgl. Zentralblatt der Bauverwaltung 1915.

ausblieb, ließ Zander den Verbindungskanal kurzer Hand ausführen. Diese eigenmächtige Handlungsweise wurde bei der nächsten Bereisung entdeckt. Der Vorfall hatte aber für Zander keine weiteren Folgen. Nur sollten etwaige bei der Prüfung als notwendig befundene Änderungen des Entwurfs, der bald darauf genehmigt wurde, nachträglich berücksichtigt werden. Bei der Vertiefung des im Hafengebiet liegenden Mündungsstücks des Dortmund-Ems-Kanals befürchtete Zander, daß der massive auf Pfahlrost gegründete Kai der Emser Brikettfabrik einer Tieferlegung der Kanalsohle vielleicht nicht gewachsen sei, obwohl bei dessen 10 Jahre zurückliegenden Erbauung hinsichtlich der Gründung auf eine Wassertiefe von 7 m Rücksicht genommen war. Er ließ deshalb vorsichtshalber den Bagger rd. 5 m von der Kaimauer entfernt die Vertiefungsarbeiten beginnen. Dies geschah morgens. In der darauf folgenden Nacht zeigten sich in der massiven Kaimauer Risse, nachdem vorher mehrere Meter lange Holzpfehlenden mit Spitze vom Bagger herausgeholt worden waren. Zander ließ sofort die auf dem gefährdeten Mauerteil stehenden Krane abfahren und nahm alle hinter der Mauer stehenden Eisenbahnwagen und Lokomotiven zurück. Der Bagger mußte ebenfalls die Arbeiten einstellen und ablegen. Bei einer Untersuchung des gefährdeten Mauerteils wurde festgestellt, daß der Rost etwas gesackt war, weil die vorderen Grundpfähle infolge der Beseitigung der Pfahlspitzen durch den Bagger nach unten gerutscht waren. Anscheinend waren bei der Erbauung die Pfahlspitzen nicht in die einige Meter von Sand überdeckte Kleimasse hineingegangen, sondern auf der Kleischicht beim Rammen entlang geglitten. Daher konnte der Bagger die vorgerutschten Pfahlspitzen in 5 m Entfernung herausholen. Bis zum Beginn der Baggerarbeiten hatte der Kai keinerlei Rißbildung gezeigt. Zander ließ die nicht mehr tragenden Holzpfehle durch eingespülte eiserne Hohlpfähle ersetzen, die mit dünnflüssigem Traßbeton gefüllt und in den Grund hineingepreßt wurden¹⁾.

Neben der Schleuse sind noch 7 Häuser auf Pfahlrost und eine biologische Kläranlage zur Klärung der Abwässer aller Gebäude hergestellt worden. Außerdem wurden je drei Brücken mit eisernem Ueberbau und massiven Widerlagern auf Pfahlrost für den Eisenbahn- und Landanschluß des Königs-Polders, ein rd. 34 m hoher eiserner Wasserturm, ein rd. 38 m hoher Eisenturm für die Zeitsignale, eine eiserne Drehbrücke für Eisenbahn, Straßenbahn, Land- und Personenverkehr mit einer 40 m breiten Durchfahrtsöffnung, ein Siel im neuen Seedeich mit 2 Flut- und 1 Ebbetorpaar bei 10 m lichter Weite mit einem Wärterhaus auf Pfahlrost und ein 10,5 m tiefes Hafenbecken von rd. 5 ha Oberfläche mit 12 Dalben von je 20 Pfählen für 6 Liegestellen für große Seedampfer gebaut. Im Eigenbetrieb wurden rd. 9 Mill. m³ Boden für den Vorflutgraben, für das Hafenbecken und für die Verbreiterung und Vertiefung des Dortmund-Ems-Kanals ausgehoben, die teilweise zur Erhöhung des Hafengeländes zu beiden Seiten des Dortmund-Ems-Kanals, zum Bau des neuen Seedeiches und zur Erhöhung des Watts vor dem alten Kaiser-Wilhelm-Polder verwendet wurden. Die Gesamtbaukosten der Hafenerweiterung betrugen 22,5 Mill. Mark, von denen die Stadt Emden $\frac{1}{6}$ übernahm.

Kurz vor Beendigung der Hafenerweiterung, also etwa 1913, hatte Zander für die Ausbesserung von Brücken (Oberbau- und Widerlager) am Ems-Jade-Kanal, der von Emden bis Aurich zum Bauamtsbezirk Emden gehörte, und am Seitenkanal im Emdener Hafenbezirk einen außerordentlichen Zuschuß zum Unterhaltungsfonds beantragt. Die Notwendigkeit der Unterhaltungsarbeiten wurde an sich anerkannt, Geld war aber hierfür nicht verfügbar. Zander erhielt aber die Erlaubnis, den ebenfalls von ihm beantragten Betrag von 40 000 Mark für Beschaffung von Kabeln für den Hafenbetrieb auf den Neubaufonds zu übernehmen, da die Beschaffung der neuen Kabel durch die Erweiterung des Emdener Außenhafens dem Grunde nach veranlaßt war. Dafür wurden dann die Mittel für die Ausbesserungsarbeiten an den Brücken des Ems-Jade-Kanals bewilligt. Für Zander war diese Regelung nicht gerade erfreulich, denn die 22½ Millionen Mark für die Hafenerweiterung waren inzwischen trotz größter Sparsamkeit so weit verbraucht oder festgelegt, daß bei seinem Fortgang von Emden am 1. Juli 1915 nur noch 30 000 Mark für die Restarbeiten vorhanden waren. Dieser Betrag hat aber zur Fertigstellung der Neubauten ausgereicht.

Auf der Ems wurden im Jahresdurchschnitt im Eigenbetrieb rd. 1,5 bis 2,0 Millionen m³ Sand- und Kleiboden zur Freihaltung des Fahrwassers und im Außenhafen rd. 1,0 Millionen m³ Schlick gebaggert. Die letzten wurden größtenteils auf das Watt vor dem alten Kaiser-Wilhelm-Polderdeich, im übrigen in die landwirtschaftlichen Absatzbecken am Dortmund-Ems-Kanal gepumpt. Letzterer wurde nach mindestens einjähriger Lagerung (teure Sorten nach dreijähriger Lagerung) zu Düngemitteln benutzt. Er trat so in scharfen Wettbewerb mit dem Kalidünger. Sand und Klei wurden dagegen schon seit langen Jahren in die Zufahrt von der Ems zum Dollart verklappt. Trotz dieser starken Zufuhr verlandete die Zufahrt zum Dollart nicht, wie sich beim Vergleich der langjährigen Peilungen ergab. In der Zufahrt herrschte ständig starker Ebbe- und Flutstrom. Dagegen fanden sich bei Baggerungen im Catje zuweilen große Kleilinsen, ein Zeichen dafür, daß der aus dem Dollart austretende Strom die in der Einfahrt verklappten Baggermassen zum Catje verschleppte, wo alljährlich große Baggerungen zur Unterhaltung des Fahrwassers nötig waren. Zander stellte daher das bisher

¹⁾ Vgl. Zander, Zentralblatt der Bauverwaltung 1915, S. 66.

übliche Verklappen des Baggerbodens ein und spülte den Boden auf das Larrelter Watt (Spülweite bis 3 km, Spülrohre 60 cm Durchmesser).

Auf Borkum wurde die Schutzmauer in vier Jahren um 1000 m verlängert, wobei gleichzeitig die Rückwand hinter dem Fußgängerbankett erheblich erhöht wurde. In Höhe der Verlängerung der Mauer wurden vier neue Bühnen mit Basaltpflasterabdeckung hergestellt, deren noch auf dem Strande liegende Köpfe durch Senkfashinen geschützt wurden. Im ersten Winter versandete die Mauerstrecke von der Sturmhecke bis zur Victoriahöhe vollständig, so daß schon der Gedanke auftauchte, diese Sandmassen, unter denen die Mauer vollständig verschwand, durch Anpflanzen von Strandhafer festzulegen. Hiergegen sprach aber der Umstand, daß die neue Mauer, die auf dem niedrigen Strand einen Erddamm hinter sich hatte, ja gerade zum Strandschutz erbaut war. Diese Frage wurde dann gegenstandslos, da die Mauer durch anhaltende Stürme im nächsten Winter wieder völlig frei gemacht wurde und in diesem Zustande verblieb. Gleichzeitig wurde aber festgestellt, daß die Köpfe der neuen Bühnen, die bei N.W. auf dem Strand liegend hergestellt waren, schon nach einem Jahr bei N.W. von der See umspült wurden und daß der Strand vor dem großen Leuchtturm an Breite und Höhe immer mehr abnahm, so daß die Strandkörbe bei M.H.W. fast bis zum Mauerfuß zurückgeholt werden mußten. Z.B. war die Hauptbühne an der Sturmhecke seit 1906 durch die überschlagenden Wellen an beiden Seiten allmählich so tief im Sande freigespült, daß bereits 1911 in der Nähe des Mauerfußes kaum noch über die Bühne hinweggesehen werden konnte. Zander hielt die Durchführung geeigneter Maßnahmen zum Schutze des Strandes für unerlässlich, u.a. schlug er vor, die für den Strandverkehr der Badegäste un bequem hoch gewordene Bühne abzubauen und im Interesse der Stranderhaltung tiefer zu legen. Es gelang ihm aber nicht, die Bereitstellung der erforderlichen Mittel für solche Maßnahmen zu erwirken. Zur Stützung der Hauptbühne hatte er schon früher nördlich der großen Sturmbühne eine flache kurze Bühne leichter Bauart angelegt, die sich bis zu seiner Versetzung im Juli 1915 gegen alle Sturmfluten gut gehalten hat.

Einen Erfolg hatte Zander aber doch. Vor dem Süden der Schutzmauer in Höhe des Leuchtturmes (rot-weiß) ging der Strand infolge des Umschlagens der Wellen bei höheren Wasserständen um das freistehende Schutzmauerende stark zurück, so daß der Bestand des sehr wichtigen Leuchtturmes bedroht war. Hier sollten zur Förderung der Ansandung und Sicherung des Strandes Anfang 1914 sechs Bühnen aus hölzernen Rundpfählen von 12 bis 15 cm Durchmesser mit Halbhölzlingen gebaut werden. Da die Bühnen von der um das Mauerende herumlaufenden See in schräger Richtung getroffen wurden, mußten sie schon während der Ausführung auf beiden Seiten durch Senkfashinen gegen Ausspülung geschützt werden. Als dann im Juni eine mittlere Sturmflut eintrat, erlitten die Bühnen sehr starke Beschädigungen, die in der Folgezeit nur notdürftig beseitigt werden konnten. Nach Zanders Ansicht hat die zwangsläufige Einschränkung der Unterhaltung wegen Mangels an Geld und Arbeitskräften die weitere Vertiefung des Strandes und dessen Abbruch erheblich gefördert, so daß in den späteren Jahren die schweren Beschädigungen der Mauer eintreten mußten. Wörtlich schreibt er: „Solange nicht durch den Bau von neuen flachen Bühnen und Verlängerung der alten Bühnen bei gleichzeitiger Tieferlegung ein neuer Anwuchs des Strandes erzielt werden kann, werden Beschädigungen der Mauer unausbleiblich sein. Besonders aber müssen die alten Bühnen tiefer gelegt werden, damit sie nicht bei einer Sturmflut als Grundwehr wirken und dem überschlagenden Wasser bei Ebbe und Flut Anlaß zur Auskolkung und Vertiefung des anliegenden Strandes bieten.“

Für die Beschäftigung von Arbeitslosen wurde zu Ende 1914 die Eindeichung des Larrelter und Wybelsumer Watts von dem Emdrer Außenhafen und der Knook (rd. 9,5 km langer Deich) begonnen, nachdem schon im Jahre 1913 der Bau des neuesten Knookster Sieles mit dahinter liegendem Sammelbecken für die Abwässer aus dem I. und II. Entwässerungsverband in einem besonders geschütteten Ringdeich mit Grundwassersenkung begonnen war. Der neue Polder ist 1756 ha groß. Der Larrelt-Wybelsumer Verband sowie die Stadt Emden wurden vertraglich zur Zahlung eines Beitrages zu den Eindeichungskosten verpflichtet. Ihre Vertreter gaben ihre Zustimmung aber erst dann, als Zander als ingenieurtechnisches Mitglied der Verbände ihnen die Versicherung gegeben hatte, daß der neue Deich für ihre Anlagen niemals nachteilig werden könnte. Der Deich wurde erst nach einigen Jahren fertiggestellt. Seine Schließung war sehr schwierig, da sich in der Deichlinie ein etwa 14 m tiefer Kolk gebildet hatte.

Während der Emdrer Amtszeit Zanders stürzte der Fehntjertiefdüker, der schon bei seinen Vorgängern als wacklig galt und bereits an mehreren Stellen ausgebaut war, ein und mußte durch einen Neubau ersetzt werden. Dieser wurde mit Hilfe einer Grundwasserabsenkung ausgeführt, wobei die Baugrube eine Spundwandumfassung erhielt.

Der alte Düker wurde gesprengt. Zander pflegte sich bei solchen Gelegenheiten in der Nähe einer Deckung aufzuhalten, und zwar so, daß er die herumfliegenden Mauerwerksstücke genau beobachten konnte, um sich dann rechtzeitig in Sicherheit zu bringen. Die Sprengbrocken seien zumeist in die Höhe geflogen und gut zu beobachten gewesen.

Die Kesselschleuse bei Emden, die die Zufahrt vom Emdrer Hafen zum Ems-Jade-Kanal durch das rote Siel vermittelt, besteht aus einem Kessel mit etwa 50 m Durchmesser und mit vier Schleusenzufahrten. Die letzteren hatten vor dem Umbau 12 und nach dem Umbau 14 Paar Stenmtore aus Holz. Zander betrachtete die Schleuse deshalb als ein Weltwunderbauwerk. Bei

einem Umbau mußte, da das Wasser im Ems-Jade-Kanal sehr knapp und oft im Kanal für die Schifffahrt keine genügende Wassertiefe vorhanden war, auf Ersparnis von Süßwasser aus dem Ems-Jade-Kanal Bedacht genommen werden. Der Umbau erfolgte deshalb mit Hilfe eines Dükerrohres von der Südschleuse unter dem Schleusenkessel zur Nordschleuse (Fahrt zum Hafen). Bei dieser Gelegenheit wurde der nördliche und südliche Schleusenkanal um eine Schiffslänge vergrößert bei gleichzeitigem Einbau eines neuen Torpaars. Die Wand des Schleusenkessels, in dem Schiffe um 90° bequem drehen können, um aus dem Emdor Hafen in die Tiefe des I. oder II. Entwässerungsverbandes einzufahren, wurde vollständig erneuert und verstärkt.

Schleswig, Juli 1915 bis Februar 1918.

Am 1. Juli 1915 wurde Zander als wasserbautechnischer Dezernent an die Regierung Schleswig versetzt und zum Regierungs- und Baurat ernannt.

Unter Zanders Oberleitung wurde von dem Wasserbauamt Husum, dem damals der Baurat Heßler vorstand, die Strandmauer auf Wittdün-Amrum erneuert und umgebaut, da die alte, aus geputztem Beton bestehende Mauer durch Einwirkung des Seewassers zerstört war. Die neue Mauer wurde aus Beton mit Hochofenzement und Klinkerverbindung hergestellt; sie erhielt einen Pfahlrost mit davorstehender hölzerner Spundwand. Zum Schutz gegen Auskolkung wurde vor der Mauer im Abstand von etwa 5 m eine zweite Spundwand zwischen zwei Halbhölzern als Rammzwingen geschlagen und der Raum zwischen beiden Spundwänden mit einer etwa 30 cm starken Buschlage, einer etwa 15 cm starken Schotterlage und einer darüber liegenden etwa 15 cm starken Basaltsäulenschicht abgedeckt. Der Basalt wurde in einigen Feldern durch Kunststeine aus Beton versuchsweise ersetzt. Diese Steine erwiesen sich dann aber für solche Werke als ungeeignet.

Während Zanders Tätigkeit in Schleswig stürzte die nördliche Hälfte der Uferschutzmauer vor Westerland auf Sylt (Bauamtsbezirk Husum) ein. Es handelte sich um eine Schwergewichtsmauer aus Beton, deren Querschnitt im Ministerium der öffentlichen Arbeiten auf Grund eingehender statischer Untersuchungen ermittelt war. Hinter dem Kopf der Mauer befand sich eine Promenade für Badegäste. Die Hinterfüllung war mit 5 cm starken Zementplatten bedeckt, aber nicht wasserdicht, so daß die überschlagenden Wellen ebenso wie Regen und Schmelzwasser großenteils in die Sandhinterfüllung hinein versickerten. Vor dieser Mauer war eine Mine beim Aufschlagen bei Seegang explodiert, wobei die Mauer etwa zur halben Länge zertrümmert wurde. Sie ist mit staatlicher Beihilfe wieder hergestellt worden. Später hat man zur größeren Standicherheit die Platten auf der Promenade hinter der Mauer wasserdicht in Zementmörtel verlegt und vor der Fußspundwand der Mauer eine schwere Vorlage aus Faschinen und Steinen als Schutz gegen Unterspülung hergestellt.

Auf der Hallig Hooge war zum Schutz der landwirtschaftlichen Betriebe gegen Ueberflutung durch mittlere Hochfluten ein Sommerdeich hergestellt. Er wurde bei jeder größeren Sturmflut beschädigt, da das von See kommende Sturmflutwasser an der Westseite den Sommerdeich überschlug, den Wohnort auf der Hallig durchströmte und an der Ostseite gegenüber dem Festlande über eine gepfasterte Senke im Deich abfloß. Im Sommerdeich befand sich ein automatisch wirkendes Sieb, das das in den Polder eingeschleuderte Wasser bei jedem außen vorbeigehenden Wellental zum Teil wieder abfließen ließ, aber mit einer reißenden Strömung, die eine dauernde Unterhaltung der Sohle zur Folge hatte. Nach Zanders Dafürhalten hätte anstelle des Sommerdeiches ein Winterdeich gebaut werden müssen. Die Kosten wären natürlich höher gewesen als die des Sommerdeiches. Aber die Ausbesserungsarbeiten waren nach jeder Sturmflut so kostspielig, daß der Winterdeich sich auf die Dauer bezahlt gemacht hätte. Die Beschränkung auf den Sommerdeich war damit begründet worden, daß die für einen Winterdeich erforderliche Kleibodenmenge in der Nähe der Hallig nicht verfügbar und die Heranschaffung von anderer Stelle in Prämmen zu teuer sei. Zander erwähnt diesen Fall als Schulbeispiel für die falsche Sparsamkeit bei Seeuferbauten. Die landwirtschaftlichen Erträge der Hallig konnten bei jeder Eindeichung gesteigert werden, sie hätten aber bei Anlage eines Winterdeiches ein noch wesentlich höheres Ergebnis erreicht.

Die Gemeinde Föhr hatte etwa 1904 unter der Oberleitung des Baurats Heßler in die vorhandene Buhne vorsorglich eine Schutzmauer aus 5 m langen Betonblöcken hineinbauen lassen. Die Düne reichte damals noch weit über die Mauer hinaus bis zur Wasserlinie am Strand. Nun wurde aber der Sand durch die vorwiegend aus dem Westen kommenden auflandenden Winde nach oben getrieben. Dadurch wurde der Strand allmählich nähergerückt und die Wellen rammten schließlich unmittelbar gegen die früher unter dem Schutz des vorliegenden Sandes stehende Mauer und wühlten den Strand vor dem Mauerfuß stellenweise so tief auf, daß einzelne Blöcke durch den Druck der Hinterfüllung umgelegt wurden. Solche Blöcke wurden nun unter Anwendung von Winden wieder aufgerichtet. Zander hätte die Blöcke gern auf Pfähle gestellt und durch eine etwa 15 cm starke und 2,5 m lange vorgeschlagene Spundwand gegen Unterspülung geschützt. Die Gemeindevertretung hielt aber eine solche Gründung und Sicherung der Mauer, die ihr überdies zu teuer war, wegen der hinter der Mauer immer noch anstehenden großen Sanddüne nicht für nötig. Als dann aber später die Sturmfluten weitere

Schäden anrichteten, stellte die Gemeindevertretung den Antrag, ihr zu den nunmehr auch von ihr als dringlich erkannten Sicherungsarbeiten an der Mauer eine staatliche Beihilfe zu gewähren. Zander konnte sich hierfür nicht mehr einsetzen, da er kurze Zeit darauf versetzt wurde.

Hannover, Februar 1918 bis März 1922.

Zum 15. Februar 1918 wurde Zander von der Regierung Schleswig an das Oberpräsidium in Hannover zur Wahrnehmung der Dienstgeschäfte des verstorbenen technischen Dirigenten der Kanalbaudirektion in Hannover, Oberbaurats Progasky, versetzt. Die Dienstgeschäfte umfaßten die Unterhaltung der fertigen Mittellandkanalstrecke von Bevergern (Dortmund-Ems-Kanal) bis Hannover, die 1916 in Betrieb genommen war, und die Bearbeitung der drei Entwürfe für die Fortführung des Kanals über Magdeburg bis Burg. Für die Teilstrecke Hannover—Magdeburg wurden drei Vergleichslinien (Nord-, Mittel- und Südlinie) untersucht und bearbeitet und gleichzeitig die Bohrungen zur Feststellung der Untergrundverhältnisse auch am Zweigkanal Börssum—Hildesheim im Eigenbetriebe durchgeführt.

Es bestand damals die Absicht, alle Arbeiten, auch die Kanalneubauten, im Eigenbetriebe auszuführen, und Zander, der zwanzigjährige Erfahrungen auf diesem Gebiete erworben hatte, war für die Leitung des Eigenbetriebes der Kanalbauten in Aussicht genommen. Die Sache kam aber anders. Die Beschaffung von Maschinen jeder Art war wegen Mangels an Rohmaterial völlig unmöglich. Ueberhaupt durften Maschinen, um möglichst viele Erwerbslose bei der Bauausführung beschäftigen zu können, nur im unbedingt notwendigen Umfang angesetzt werden. Dazu kamen der Kohlenmangel und die im riesigen Tempo vorangehende Inflation mit allen ihren Folgeerscheinungen. Unter Berücksichtigung aller Umstände wurden die Arbeiten am Kanal auf Grund eines Halbkolonialvertrages ausgeschrieben; bis zum Zuschlag wurden aber andauernd Erwerbslose, zuweilen bis 500 an einem Tage, eingestellt und anfangs mit Rodungsarbeiten in der Kanallinie beschäftigt. Da die Frage, ob Mittel- oder Südlinie, noch nicht entschieden war, wurde der Kanal zunächst nur bis Peine mit dem Zweigkanal nach Hildesheim ausgeschrieben; letzterer sollte zur Kostenersparnis nur eingleisig mit Ausweichstellen ausgebaut werden, wobei aber alle Bauwerke für den späteren zweigleisigen Kanal eingerichtet werden sollten. Zander hat diese letztere Bestimmung bedauert, da hierbei nur etwa 10 bis 12 v. H. der Bausumme gespart wurden, während nach seiner Ansicht der Verkehr auf dem 14,73 km langen Zweigkanal durch den eingleisigen Verkehr auf lange Sicht stark in seiner Entwicklung behindert oder gar völlig eingeschränkt wurde.

Der Kolonialvertrag entwickelte sich bei den Bauarbeiten erheblich anders, als man allgemein angenommen hatte. Zunächst mußten die Arbeitslöhne infolge der zunehmenden Geldentwertung dauernd erhöht und dementsprechend auch die Preise der Unternehmer geändert werden; dann brachten die Unternehmer ihre alten und seit langer Zeit nicht mehr überholten Geräte auf die Baustelle, wo sie auf Staatskosten instand gesetzt wurden. Auch die hierzu notwendigen Materialien lieferte der Staat. Wegen des Eisenmangels mußte die Herstellung von Bauwerken auf ein Mindestmaß eingeschränkt werden. Eiserner Brücken wurden fast gar nicht mehr gebaut, statt ihrer wurden Betonbrücken gewählt. Dabei wurden als Eiseneinlagen alte Eisenbahnschwellen, Schienenstücke usw. verwendet, weil regelrechte Rundisen nicht oder nicht rechtzeitig zu haben waren. Es fehlte überall am technischen Aufsichtspersonal und an der notwendigen Baupraxis.

Magdeburg, von April 1922 bis September 1933.

Zum 1. April 1922 wurde Zander, der inzwischen zum Wasserbaudirektor ernannt worden war, als Elbstrombaudirektor an das Oberpräsidium in Magdeburg versetzt als Nachfolger des etwa 20 Jahre im Amt gewesenen Strombaudirektors Roloff. Zander äußerte bei Uebernahme dieser Stelle den Wunsch, die Fertigstellung des Kanals von Dangelbeck bis Burg sowie die Bearbeitung der Harztalsperre zu erhalten. Dieser Wunsch wurde ihm erfüllt. Die Tätigkeit als Elbstrombaudirektor, verbunden mit dem Amt eines Preussischen Staatskommissars für die Elbschifferprüfungskommissionen in Preußen, war sehr umfangreich und interessant. Das Geld für den Bau wurde im Etat angefordert und stets ungekürzt bewilligt. Viel Abwechslung boten die Verhandlungen mit der Schifffahrt und mit den Elbuferstaaten. Die Schifffahrt hatte dauernd Wünsche, damals in erster Linie den Ausbau der Elbe, auf deren ungünstigen Zustand sie ihr schlechtes Geschäft schob, während es nach Zanders Ansicht seinen Grund im Fehlen des Importes hatte, der sonst die Bergfahrt belebte.

Zander schreibt hierzu wörtlich: „Neugierig bin ich auf die Einstellung der Elbeschifffahrt, wenn zum erstenmal nach dem N.W.-Entwurf bei niedrigen Wasserständen das Wehr bei Rothensee zugesetzt und die Schleppzüge, welche bisher bis etwa 1000 m lang waren, geteilt und nach der Schleusung wieder zusammengestellt werden müssen. Es gibt hierbei ohne Zweifel einen erheblichen Zeitverlust und Mehrkosten für den zweiten Schlepper zum Einfahren des zweiten Teiles des Anhangs in die zweite Schleuse. Meines Erachtens muß die Schifffahrt diese Kosten ungekürzt übernehmen, da sie oberhalb des Wehres im angestauten

tieferen Wasser eine bequeme Fahrt vielleicht haben wird. Ich habe seinerzeit bei der Bearbeitung des N.W.-Entwurfes (1931) auf der ganzen Elbe die Anlage von Schleusen wegen des damit zweifellos verbundenen Aufenthaltes vermieden; hierin stimmten auch die Vertreter der Elbeschifffahrt mit mir überein. Die Zukunft wird ja zeigen, wer Recht hat.“

Die Bauten an der Mittellandkanalstrecke Dangelbeck bis Burg (rechtes Elbeufer) waren nicht so überanstrengend wie der Bau der Strecke Hannover—Peine einschließlich des Zweigkanals nach Hildesheim. Anfangs waren auch hier die Baugelder schwer zu erhalten und mancher neue Bauplan mußte aufgestellt werden, wenn zur Beschäftigung der Arbeitslosen neue Summen bereitgestellt werden sollten. Allmählich besserten sich aber die Verhältnisse wesentlich. Die Vergebung der Arbeiten erfolgte nicht mehr nach dem Halbkolonialvertrag, da während der Hannoverschen Bauzeit hiermit keine anreizenden Erfahrungen gemacht worden waren. Die Bedingungen für die Ausführung wurden nach den alten bewährten Regeln aufgestellt. Anfangs wurden die ausgeschriebenen Bauausführungen an Vereinigungen mehrerer Unternehmer vergeben, um eine tunlichst gleichmäßige Verteilung der Arbeiten auf die Firmen mit geeigneten Geräten zu erzielen. Die hierbei gemachten Erfahrungen waren aber nicht immer günstig. Es fanden sich denn auch wieder genügend leistungsfähige Firmen, so daß das alte System der Vergebung an Einzelfirmen wieder aufgenommen werden konnte. Um möglichst viele Firmen zu beschäftigen, wurden die Baulose klein gehalten. Arbeitskräfte waren genügend vorhanden, auch die Beschaffung und Ueberholung der Geräte und aller zu den Bauten erforderlichen Materialien war zeitgemäß und reibungslos. So konnte auch die Auswahl des Materials für die Brücken wieder mehr den Zwecken als den verfügbaren Vorräten angepaßt werden. Die Baugelder waren jetzt sicherer und rechtzeitig zu erwarten, so daß Stockungen in der Bauausführung weniger auftraten als früher. Ursprünglich sollte der ganze Bau des Kanals bis Berlin Oktober 1933 vollendet sein. Man begnügte sich dann aber damit, diesen Termin für die Kanalstrecke bis Magdeburg fortzusetzen. Alle Bauwerke, auch der 18 m hohe Erddamm bei Glindenberg waren schon 1932 fertig, ebenso der Abstieg zur Elbe, aber ohne das Hebewerk Rothensee, das erst 1931 begonnen war. Erst als dieses Bauwerk im Oktober 1933 fertiggestellt war, konnte der Kanal vom Rhein bis zur Elbe in vollem Umfange befahren werden. Während seiner Dienstzeit in Magdeburg war Zander häufig als Wasserbauingenieur in Anhalt für die dortige Wasserbaubehörde tätig. Er hat z. B. die Eindeichung der Rehsener Bucht mitbearbeitet. Durch die Eindeichung wurden rd. 625 ha vor Ueberflutung geschützt. Bei großer, langandauernder Trockenheit kann der neue Polder durch ein Stauwerk im Grenzgraben künstlich bewässert werden. Das überschüssige Wasser wird durch ein Siel in die Elbe abgelassen. Außerdem hat Zander den Neubau einer Brücke im Vorflutgebiet der Mulde begutachtet und an der Aufstellung einer Hochwassermeldeordnung für die Mulde mitgewirkt.

Im Ruhestande.

Am 24. Juni 1924 wurde Zander zum Dr.-Ing. e. h. von der Technischen Hochschule Hannover ernannt, am 21. Juli 1927 verlieh ihm die Technische Hochschule in Braunschweig die akademische Würde eines Ehrensensors; am 29. Juni 1929 wurde er zum a. o. Mitglied der Akademie des Bauwesens in Berlin ernannt. Am 30. September 1933 trat er, nachdem er am 27. Mai 1933 das 65. Lebensjahr beendet hatte, in den Ruhestand und siedelte nach Hannover über, wo er an der Technischen Hochschule als Honorarprofessor Vorlesungen über Verkehrswasserbau bis zum W.S. 1936/37 hielt. Diese Vorlesungen stellte Zander ein, nachdem er die einjährige Vertretung des am 29. März 1936 verstorbenen Professors Otto Franzius beendet hatte. Bald nach seiner Uebersiedlung nach Hannover hat er als Mitglied der städtischen Baukommission die Bauleitung für den Maschsee fast 2 Jahre technisch-wissenschaftlich beraten. Gleichzeitig hatte er die Oberleitung für den Bau eines 950 m langen Industriehafens bei Roßlau. Später hat Zander einige Gutachten bearbeitet, u. a. auch für die Dresdner Gas-, Elektrizitäts- und Wasserwerke (Drewag), für das Oberlandesgericht in Naumburg in Zivilprozessen, für die Esag in Halle für Wiederherstellungsarbeiten an einem Saalekraftwerk sowie für das Braunkohlensyndikat in Senftenberg über die Regulierungs- und Räumungsarbeiten an der Schwarzen Elster.

Im Januar 1940 hielt Zander in Hannover einen Vortrag über Eisbrecherarbeiten auf Strömen und Kanälen. Im Verfolg dieses Vortrags erhielt Zander die Einladung zur Teilnahme an einer Besichtigung der Weichsel zum Zwecke der Beratung bei der Ausführung von Eisaufbrucharbeiten auf der Weichsel bis Forden. Er hat dann am 4. und 5. Februar 1940 bei —20 bis —22° Kälte, völliger Windstille und herrlichster glitzernder Schneedecke mit einem Dienstkraftwagen die Weichsel von Danzig-Dirschau bis Forden besichtigt und im Anschluß hieran in Danzig die Deichinteressenten beraten. Er war hierzu besonders berufen, da er an der Ems und an der Elbe 11 Jahre hindurch die Eisbrecherflottille von 8 Dampfern bei Eisaufbrucharbeiten befehligt und dabei große Erfahrungen gesammelt hatte. In seinem Reisebericht hat Zander auch Vorschläge für die vorsorglichen Vorbereitungen zu einem Eisaufbruch gemacht, aber darauf hingewiesen, daß die wirkliche Durchführung stets von den jeweiligen Strom- und Eisverhältnissen abhängig und nicht vorher übersehbar ist. Bei der Besichtigung lag vor der Weichselmündung auf dem Haff eine starke, feste Eisdecke, die nicht gebrochen werden konnte,

so daß Eisbrecher von der See her nicht in die Weichselmündung vordringen konnten. Eine solche starre Eisdecke verhindert den Abfluß des aufgebrochenen Weichseleises. Zanders dienstlicher Lebenslauf wurde von ihm am 27. Mai 1941 unterzeichnet. Am Schluß stehen die Worte:

„Nun muß ich wahrscheinlich mein an vielen schönen Erfolgen, aber auch an Arbeitsleistung überreiches Leben geruhsam beschließen. Indessen bleibt mein alter Wahrspruch:

Arbeit ist das Leben und Ruhe der Tod

unbeschränkt bestehen. Schön war es doch besonders an der Waterkant, die mir stets unvergeßlich bleiben wird.“

Die Abwasserreinigung und die sich dabei abspielenden stofflichen Vorgänge

Von Professor Dr.-Ing. Erwin Marquardt, Reutlingen

I. Grundsätzliches

Bei der Ableitung des Abwassers aus dem Wohnbereich, d. h. bei der Ortsentwässerung im engeren Sinn, hat man es im wesentlichen mit Vorgängen zu tun, die den Gesetzen der Mechanik und besonders der Hydraulik unterliegen, mit denen der Wasserbauingenieur auf Grund seines Studienganges wohl vertraut ist. Bei der Reinigung der Abwässer kommen aber Vorgänge stofflicher Art hinzu, die ins Gebiet der Chemie und Biologie schlagen, die dem Ingenieurstudium i. a. entfernter liegen. Da nun das Verständnis dieser Vorgänge eine Vorbedingung für die Beherrschung der Abwasserreinigungstechnik bildet und da biologische Kenntnisse vielseitig befruchtend wirken, sollen diese Vorgänge im folgenden soweit erläutert werden, als es notwendig ist, um dem Ingenieur Klarheit darüber zu verschaffen, was bei der Abwasserreinigung eigentlich dem Auge unsichtbar vor sich geht und worauf die einzelnen Maßnahmen dieser Technik beruhen.

Nach DIN 4045 (Formelzeichen und Begriffsbezeichnungen in der Abwassertechnik) ist Abwasser durch den häuslichen, gewerblichen oder industriellen Gebrauch verunreinigtes (Schmutzwasser) und von Niederschlägen abfließendes Wasser (Niederschlagswasser), also eine Mischung von Wasser mit Schmutzstoffen (Mischwasser). Unter letzteren sind alle Stoffe zu verstehen, die dem Wasser den Charakter der Verunreinigung in dem Sinn geben, daß dieses Schmutzwasser zu Mißständen hygienischer, ästhetischer und vor allem wirtschaftlicher (Fischerei, Landwirtschaft, Industrie) Art Anlaß geben kann. Nicht zu den Schmutzstoffen gehören Stoffe, die das Wasser in seinem natürlichen, von menschlicher Einwirkung unberührten Kreislauf aufnimmt und mit sich führt, wie gewisse Mineralstoffe, die in jedem Leitungswasser enthalten sind (Abb. 1)¹⁾, von Flüssen mitgeführte Geschiebe- und Schwebstoffe u. dergl. Praktisch gesehen handelt es sich also bei den Schmutzstoffen um die mit dem Haus-, Gewerbe- und Industrieabwasser sowie dem Niederschlagswasser in die Leitungen gespülten Unratmassen der Häuser und die Abfallstoffe der verschiedenen Gewerbe. Wir beschränken uns hier auf städtisches Abwasser ohne wesentliche Zulaufe gewerblicher Abfallflüssigkeiten.

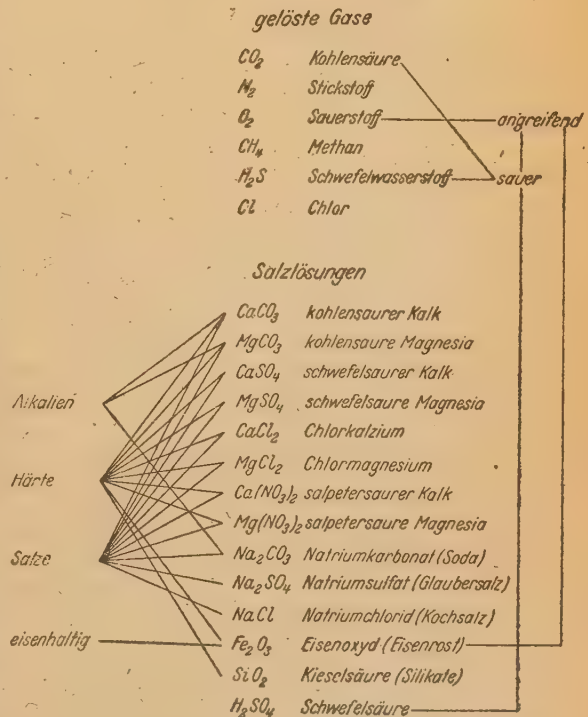


Abb. 1. Die wichtigsten chemischen Bestandteile des natürlichen Wassers.

¹⁾ Aus Marquardt, Wasserversorgung und Entwässerung der Städte, landwirtschaftlicher Wasserversorgung. Taschenbuch für Bauingenieure von F. Schleicher, S. 1101. Berlin 1943, Springer-Verlag.

Chemische Zusammensetzung verschiedener Wasserarten:

1 Liter Niederschlagswasser enthält bei 10° C und 760 mm Barometerstand:

Stickstoff	14,5 cm ³ = 17,5 mg	Schwefelsäure: Industriezentrum bis 30 mg
Sauerstoff	7,97 „ = 11,0 „	Bakterien
Argon	0,42 „ = 0,73 „	Schimmelpilze.
Kohlensäure	0,36 „ = 0,68 „	Lösungstoffe im Flußwasser sind:
Helium	0,00007 cm ³	Kalziumkarbonat (vorherrschend)
Wasserstoff	0,00002 cm ³	Kalziumsulfat
Radiumemanation	1,10 ⁻¹⁷ cm ³	Chlornatrium
Ammoniak	0,1—5 mg	Magnesiumsulfat
Schwefelsäure; Berggebiet	2 mg	Magnesiumkarbonat
Schnee bis 25,6 mg SO ₂		Kalium (nur wenig)
Salpetersäure bis 1 mg		

Sauerstoffgehalt: ist groß wegen der chlorophyllhaltigen Pflanzen; viel Sauerstoff bei großer Lichtintensität.

Das Abwasser „reinigen“ heißt nun, die Schmutzstoffe soweit aus demselben entfernen oder verändern, daß die behandelte Flüssigkeit den verunreinigenden Charakter verliert und zu Mißständen

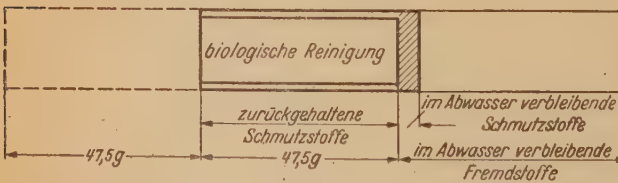
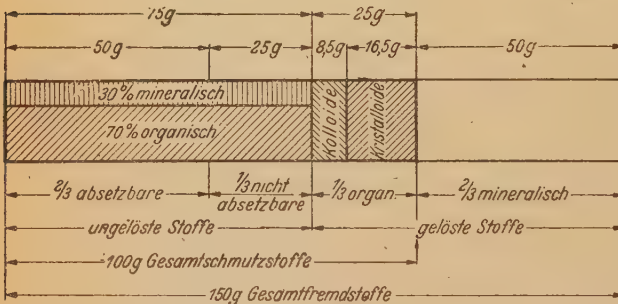


Abb. 2. Darstellung der durchschnittl. Verschmutzung von städtischem Abwasser ohne Großgewerbe und Reinigungswirkung der Klärverfahren (nach Prüß).

können im Wasser in Schwebel bleiben. Dies hängt sowohl von der Wichte dieser Stoffe ab, wie auch von ihrer Größe. Es können nämlich auch Stoffe, deren Wichte beträchtlich größer ist, als die des Wassers, d. h. größer als 1, gleichwohl im Wasser schweben, wenn ihr Teilchendurchmesser so klein ist, daß infolge der dadurch gegebenen großen Gesamtoberfläche dieser Teilchen (spezifische Oberfläche) der Betrag der Reibung im Wasser höher wird als der der Schwerkraft, wenn also dem Zug nach unten die Reibung als Hemmung entgegenwirkt. Im gleichen Sinn wie die Reibung wirkt die Bewegung (Fließgeschwindigkeit) des Wassers als eine den Zug nach unten aufwiegende Kraft.

2) Vgl. auch K. Imhoff, Taschenbuch der Stadtentwässerung. 11. Aufl. S. 59—63. München 1947, R. Oldenburg.

Die Entfernung der ungelösten Stoffe aus dem Abwasser beruht im wesentlichen auf mechanischen Vorgängen wie Absieben, Filtern, Absetzen, Aufschwimmen, die hier nicht erörtert werden sollen.

Bei weitergehender Verteilung der Stoffsubstanz sind die Teilchen nicht mehr mit freiem Auge oder mit der Lupe körperlich sichtbar, man bedarf dann allenfalls starker Mikroskopvergrößerungen, um sie als solche zu erkennen, oder kann ihre Anwesenheit optisch nur durch das sogenannte Tyndall-Phänomen wahrnehmen. Es handelt sich hier um einen Verteilungszustand, der sog. kolloiden (griechisch: kolla = Leim). Größenordnung, deren Umfang recht weit ist und im Verhältnis ebenso zahllose Uebergänge aufweisen kann, wie im Grobverteilungszustand.

Kolloide Größenordnung ist indes nicht mit dem „kolloiden Zustand“ zu verwechseln, denn der letztere erfordert die Anwesenheit eines dritten, gelösten Stoffes, der die kleinen Teilchen mit dem Wasser gewissermaßen verleimt (solution link).

Die Kolloide spielen in der Abwasserreinigung eine sehr wichtige Rolle, da ein erheblicher Teil des Abwasserumrates organische Kolloide sind oder bei der Abwasserbehandlung in solche übergeht. Kolloide verursachen eine mehr oder minder starke Trübung oder Opaleszenz (Schillern des Wassers). Die kolloide Trübe (Beispiel: Auflösen von Tischlerleim oder Seife im Wasser) ist mit der von feinen Schwebstoffteilchen herrührenden Trübe (Beispiel: Aufschwimmen von Ton im Wasser) nicht zu verwechseln. Indes läßt sich keine feste Grenze ziehen, wo eine Schwebstofftrübe aufhört und Kolloidtrübe beginnt. M. a. W.: Zwischen grober Verteilung und kolloider Größenordnung gibt es keine scharfe Grenze. Man nimmt an, daß die erstere bis zum Teilchendurchmesser von 0,0001 mm (0,1 μ) und letztere bis 0,000001 mm (1 m μ) sich erstreckt. Im Gebiet der kleineren Kolloidteilchengrößen erscheinen bereits Molekeln, d. h. Kleinstteilchen der Substanz, die nicht mehr mit physischen Mitteln spaltbar und gegebenenfalls nur noch chemisch, d. h. durch Wechselwirkung mit anderen Stoffmolekeln in Atome zerlegbar sind. Der Durchmesser des kleinsten bekannten Molekels, der des Heliums, ist zu $1,9 \cdot 10^{-8}$ berechnet worden, des Wasserstoffs zu $2,38 \cdot 10^{-8}$, des Sauerstoffs zu $3,19 \cdot 10^{-8}$, und des Wassers (Wasserdampfes) zu $4,0 \cdot 10^{-8}$ cm. Molekel höherer Verbindungen können beträchtlich größer sein, z. B. die Eiweißarten. Immerhin, löst man 1 mg Hühnereiweiß in 1 l Wasser, so befinden sich in 1 mm³ der Lösung noch immer 10^{11} Eiweißmolekeln. Fügen wir noch die Schwere eines Wasserstoffatoms (1 Wasserstoffmolekel besteht aus 2 Atomen) hinzu, die $1,66 \cdot 10^{-24}$ gr beträgt, dann ist das Bild der Möglichkeiten der Feinverteilung der Materie abgerundet.

Der Durchmesser bekannter Bakterienarten liegt meist im Bereich des Mikron-Maßstabes (1 Mikron = 1 μ = 0,001 mm). Abb. 4 läßt die Größenunterschiede zwischen Sandkörnern und Bakterien erkennen. Die Frage, ob es nicht etwa Organismen gibt, die noch viel kleiner sind als Bakterien, ist bis heute noch offen; manches spricht dafür.

Nun gibt es umkehrbare (reversible) und nicht umkehrbare (irreversible) Kolloide. Die umkehrbaren bleiben, wenn man ihre wässrige Auflösung erhitzt, sowie wenn man sie ganz eintrocknen läßt, unverändert und lassen sich bei erneutem Wasserzusatz abermals in Auflösung bringen. Z. B. Tischlerleim behält bei den genannten Vorgängen sein „Lösungsglied“. Nicht umkehrbare Kolloide verlieren dieses beim Erhitzen oder Eintrocknen und gehen infolgedessen in ungelösten Zustand über, aus dem sie nicht ohne weiteres in wässrige Auflösung gebracht werden können, wie es z. B. beim Hühnereiweiß der Fall ist.

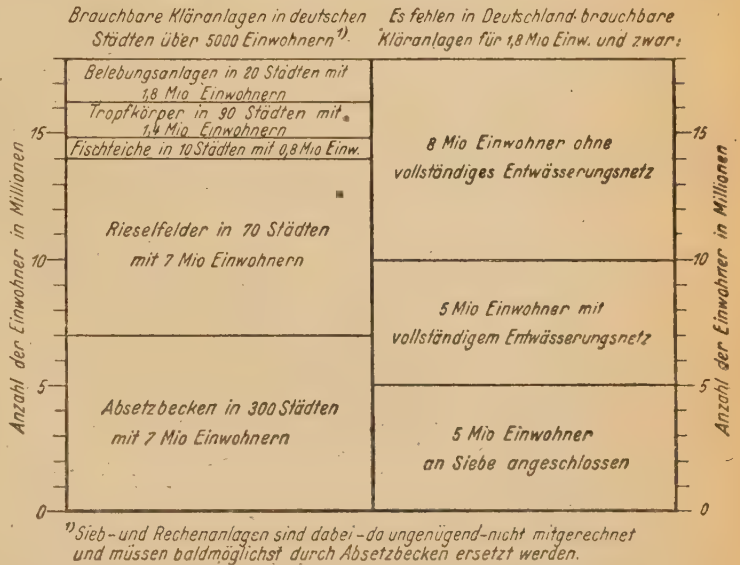


Abb. 3. Stand der Abwasserreinigung und -Verwertung in Deutschland um 1941 (nach K. Imhoff).

Im Abwasser sind meist beide Arten von Kolloiden vertreten. Infolge der schwankenden Form der Kolloide (sie stecken bildlich ausgedrückt mit einem Fuß im ungelösten, mit dem anderen im gelösten Gebiet) können sie durch gewisse Einwirkungen (chemischer oder elektrochemischer Art) ihr Lösungsglied einbüßen (vgl. oben) und scheiden sich dann im Wasser als ungelöste Stoffe ab. Man nennt einen solchen Vorgang „Ausflockung“. Andererseits können ähnliche Einwirkungen zum gänzlichen Auseinanderreißen und Freiwerden der Stoffmolekel führen, so daß sie nunmehr „echt“ gelöst im Wasser sind.

Ausgeflockte Kolloide können durch sog. Fermente, unter denen gewisse Ausscheidungen lebender Zellen zu verstehen sind, in Lösung, allerdings unter Aenderung ihres molekularen Aufbaues, gebracht werden. So wird z. B. hartgekochtes Hühnereiweiß im Magen durch Verdauungsfermente in Lösung gebracht. Die Ausflockung von Kolloiden und die Lösung der ausgeflockten Stoffe durch Bakterienfermente (Enzyme) zählen zu den wichtigsten Vorgängen bei der biologischen Abwasserreinigung.

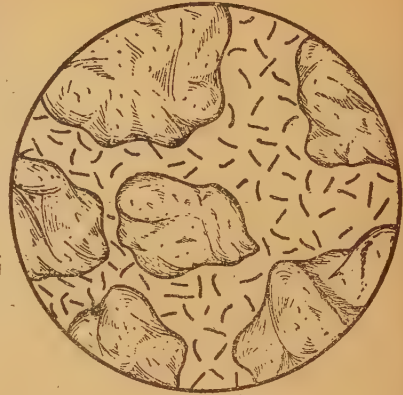


Abb. 4. Feinste Sandkörnerchen mit dazwischen gelagerten großen Stäbchenbakterien (halbschematisch). (Nach Spitta-Reichle, Wasserversorgung, 2. Aufl., S. 141 1924).

2. Gelöste Stoffe.

Befindet sich ein Stoff im Wasser in molekularer Verteilung, d. h. wenn seine Molekeln (Kleinstteilchen) frei im Wasser schweben, dann sprechen wir von einer (echten) Lösung dieses Stoffes im Wasser (oder in einem anderen flüssigen Medium). Es gibt Stoffe, die, ins Wasser gebracht, sich alsbald molekular verteilen (z. B. Salz, Zucker) und solche, die sich schwer oder fast gar nicht lösen. Die Erörterung der physikalisch-chemischen Ursachen dieses Verhaltens muß hier aus Raumgründen unterbleiben.

Es ist einleuchtend, daß man nun einen Stoff um so einfacher und mit geringerem Arbeitsaufwand aus dem Wasser hinaustreiben kann, je größer der Verteilungszustand des betreffenden Stoffes im Wasser ist. Ein Stein, der in einen Eimer mit Wasser fällt, ist einfach herauszuholen. Zerstampft man aber den Stein zu Pulver und schüttet dieses ins Wasser, so bedarf es unverhältnismäßig größerer Anstrengungen, um das Wasser von dem Fremdstoff restlos zu befreien. Einen Klumpen Salz, der sich im Wasser auflöst, kann man nur wiedergewinnen, wenn man das Wasser durch Verdampfen entfernt. Gelöst verteilte Stoffe können also nur durch Ueberführung in gröbere Verteilung aus dem Wasser beseitigt werden, d. h. durch Zusammenlagern zahlreicher Molekeln zu körperlichen Teilchen, also in ungelöstem Zustand, oder, falls dies nicht möglich ist, besonders durch Aufspalten der Molekel und anschließende andersartige Verbindung ihrer Atome (Urteilchen) in unschädliche Stoffe, u. U. dadurch, daß man ihr Entweichen aus dem Wasser in Gasform herbeiführt. Die einschlägigen Vorgänge sind chemischer oder biologischer Natur, sie bedienen sich nicht mehr und nicht lediglich mechanischer Mittel, sondern bringen molekulare Energien, sowie solche der Lebenskräfte von Kleinlebewesen in Tätigkeit, um das gewünschte Ziel zu erreichen.

Zwischen dem ungelösten und gelösten Verteilungszustand liegt die bereits erwähnte Form der Kolloide, die dadurch ermöglicht wird, daß die Molekel der betr. Stoffteilchen unter Vermittlung anderer Molekel, die als „Lösungsglieder“ (solution link) dienen, mit Wassermolekeln lose verbunden sind und so mit dem Wasser eine „Halblösung“ (Pseudolösung, kolloide Lösung im Gegensatz zur echten Lösung) bilden.

III. Die Reinigungsmöglichkeiten des Abwassers

Der Verteilungszustand der aus dem Abwasser zu entfernenden Stoffe ist demnach von entscheidendem Einfluß auf die dazu zu ergreifenden Maßnahmen und bestimmend für den erforderlichen Arbeitsaufwand. Neben den mechanischen, bei der Bewegung des Abwassers unvermeidlichen Einwirkungen wird nun der Uebergang aus gröberen in feinere Verteilungsstufen der Unratstoffe hauptsächlich durch Fäulnis begünstigt. Daraus ergibt sich, von anderen wichtigen Gesichtspunkten abgesehen, die Bedeutung der Frischerhaltung des Abwassers als eines die Reinigungsarbeit vereinfachenden und verbilligenden Umstandes. Auf die hierfür geeigneten baulichen und betrieblichen Maßnahmen (Vermeidung zu ausgedehnter Leitungsnetze und von Stauungen in ihnen, in Linienführung, Gefälle, Querschnittsform und -beschaffenheit zweckmäßige Leitungen, gute Instandhaltung, Reinigung, Spülung und Lüftung des Leitungsnetzes usw.) kann hier nicht eingegangen werden.

Aus dem Vorgesagten ergibt sich, daß man zum Entfernen der unerwünschten Stoffe aus dem Abwasser, d. h. zu dessen Reinigung, die betr. Stoffe in grobe Verteilung, sofern sie nicht schon bzw. noch nicht vorliegt, in eine solche überführen muß. Wenn dies hinsichtlich eines Teiles der feinstverteilten Stoffe oder gewisser Gruppen derselben nicht oder nicht mehr möglich ist,

so muß man versuchen, sie derart umzuändern, daß die im Wasser gelöst verbleibenden oder teilweise als Gase entweichenden Um- oder Abbauprodukte nicht mehr zu Mißständen führen. Je weitergehend dies erreicht wird, desto vollständiger ist die Abwasserreinigung.

Bei Abscheiden der Grobverteilungsstoffe aus dem Abwasser, die in diesem Zustand angeschwemmt werden oder die aus der feinen (kolloiden und gelösten) Verteilung in die grobe überführt werden konnten, werden die betreffenden Stoffe stets zunächst in Verquickung mit ihre Masse stark überwiegenden Wassermengen als Schlamm (Klärschlamm) gewonnen (Abb. 5).

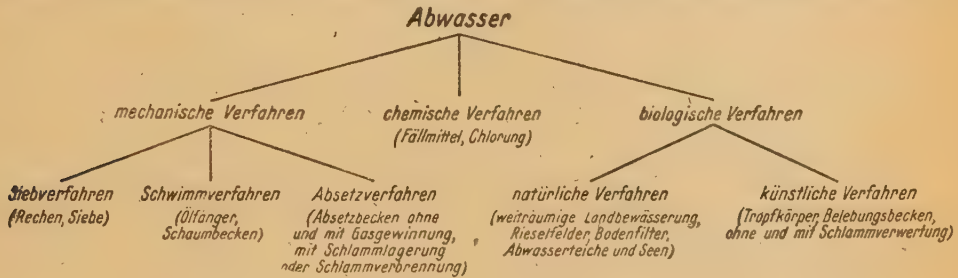


Abb. 5. Das Wesen der Abwasserbehandlung.

Dieser stellt demnach einen unausweichlichen Rückstand jeder Abwasserreinigung dar, die als technischer Prozeß betrachtet, zwei zueinander gehörende Aufgaben umfaßt: die Erzeugung eines Ablaufwassers (Klärproduktes), das ohne Mißstände in die Vorflut eingeleitet werden kann und die Beseitigung oder Aufarbeitung der anfallenden Schlammmassen in schädigungsfreier Weise. Diese letztere Aufgabe kann oft erheblich schwieriger sein als die erstere. Zur Entfernung der „ungelösten Stoffe“ aus dem Abwasser braucht man keine anderen als mechanische Mittel. Diese Stoffe kann man z. B. mit Rechen oder Sieben abfangen, oder nach Absetzen als Schlamm abpumpen, oder nach Aufschwimmen als Schwimmschicht abstreifen u. dergl. m. Anlagen, die im wesentlichen die Beseitigung des ungelösten Unrates des Abwassers bezwecken, werden daher gewöhnlich mechanische Kläranlagen genannt. Wird dem Teilvorgang des Schlammabsetzens durch Zusatz von Chemikalien nachgeholfen, so bezeichnet man es als chemisch-mechanische Klärung.

Sind die ungelösten Schmutzstoffe aus dem Abwasser herausgebracht, dann verbleiben, abgesehen davon, daß es praktisch meist nicht möglich ist, alles Ungelöste bis auf den letzten Rest zu entfernen, die feinverteilten, d. h. kolloiden und echt (molekular) gelösten Stoffe, deren Beseitigung oder Unschädlichmachung weitaus tiefer greifender Mittel als bei der mechanischen Klärung bedarf.

Der oben erwähnte Zusatz gewisser Chemikalien kann mitunter einen beschränkten Teil der Aufgabe erfüllen, nämlich die noch von der mechanischen Klärung verbliebenen ungelösten Reststoffe und einen unerheblichen Bruchteil der Kolloidteilchen als Schlamm abzusecheiden. Damit erschöpft sich die Wirkung der „chemischen Klärung“. Der Großteil des kolloiden und gelösten Abwasserunrates kann aber, entsprechend seiner Feinverteilung nur durch Anwenden außerordentlich starker Energien teils in ungelöste Substanz überführt teils zu unschädlichen, im Wasser verbleibenden oder als Gas entweichenden Verbindungen um- oder abgebaut werden. Solche stärkste Energien entwickelt die Natur in der Lebenstätigkeit ihrer kleinsten Organismen, der Bakterien. Dieser muß sich die Technik planmäßig bedienen, um die weitergehende Reinigung des Abwassers mit Erfolg zu bewältigen. Weil hierbei nun biologische Vorgänge entscheidend sind, werden die einschlägigen mannigfachen Einrichtungen biologische Reinigungsanlagen genannt. Folgt die biologische Anlage der mechanischen, so pflegt man die letztere „Vorreinigung“ zu nennen.

IV. Die Art der Abwasserstoffe

Es fragt sich nun, welcher Art die Stoffe sind, die beim Einleiten des Abwassers in die Vorflut Mißstände verursachen und wodurch letztere entstehen. Die Fremdstoffe, die in die Entwässerungsnetze gelangen und mit dem Abwasser abgeschwemmt werden, sind teils mineralischer, teils organischer Natur.

1. Die mineralischen Stoffe.

Als mineralisch werden Stoffe (fest, flüssig oder gasförmig) bezeichnet, in deren molekularem Aufbau Kohlenstoff in chemischer Bindung mit anderen Elementen nicht oder mit Sauerstoff gesättigt vorkommt. Im wesentlichen ungebundener Kohlenstoff, wie er z. B. in Steinkohlen vorliegt, kann im Sinne der Abwasserreinigung als mineralischer Stoff angesprochen werden, nicht aber Braunkohlen oder Torfe, die organische Stoffe darstellen. Die sog. „Mineralöle“

(Erdöl und daraus erzeugte Produkte) sind organische Stoffe. Weitere Beispiele für mineralische Stoffe sind die natürlichen Steine, Tone, Salze, Aschen, das Wasser, die Kohlensäure (mit Wasser abgesättigter Kohlenstoff).

Die mineralischen Stoffe, die, soweit löslich, z. T. im Trink- und Brauchwasser enthalten sind (Abb. 1), geben, von bestimmten Ausnahmen abgesehen, i. a. zu größeren Abwasserschäden, insbesondere solchen hygienischer und ästhetischer Art keinen Anlaß, obschon sie, wenn in größeren Mengen im Abwasser enthalten, Schwierigkeiten durch Ablagerungen, Versalzung, Versäuerung oder Verlaugung von Wasserläufen verursachen können und in solchen Fällen zu angemessenen Maßnahmen zwingen.

2. Die organischen Stoffe

Die Hauptsorge bei der Abwasserreinigung und deren wichtigsten Maßnahmen gelten indes den organischen Stoffen, d. h. Verbindungen des Kohlenstoffes mit anderen Elementen, besonders Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor. Hierbei ist aber hinsichtlich des Sauerstoffes eine Einschränkung zu machen. Allen organischen Stoffen ist nämlich eigen, daß — sofern sie überhaupt Sauerstoff enthalten — dessen Menge unzureichend ist, um alle anderen Bauelemente des Molekels mit Sauerstoff zu sättigen, sie zu „oxydieren“. Die organischen Verbindungen sind „sauerstoffarm“, wie z. B. Eiweißstoffe, bis „sauerstoffleer“, wie z. B. Kohlenwasserstoffe (Methan usw.). „Sauerstoffsatte“ Verbindungen sind stets „mineralisch“ (vgl. oben Kohlensäure).

Die im Abwasser vorkommenden organischen Stoffe sind meist keine reinen Verbindungen im chemischen Sinne, sondern Gebilde, in denen neben der organischen auch mehr oder weniger mineralische Masse (Asche) enthalten ist. Nicht alle dieser schier zahllosen im Abwasser vorkommenden Verbindungen, die das gewaltige Gebiet der organischen Chemie bilden, sind in gleichem Maße schädlich im Sinne der Abwassermißstände: Die ausgesprochenen Schädlinge sind vielmehr in der Hauptsache jene organischen Stoffe, deren Ursprung auf menschliche, tierische und pflanzliche Lebensvorgänge zurückzuführen ist und die die abgestoßenen oder abgestorbenen Rückstände des natürlichen Lebensablaufes darstellen. Charakteristisch für die betr. Verbindungen, zu denen vor allem die Eiweißstoffe und ihre höheren Abbauprodukte gehören, ist die außerordentliche Größe und der verwinkelte innere Bau ihrer Molekeln, die aus je Hunderten oder Tausenden von Atomen bestehen können, sodaß es bis heute der Chemie noch nicht gelang, ihre genaue Zusammensetzung und Struktur zu ermitteln. Ein weiteres Merkmal dieser Stoffe ist die stete Anwesenheit von Stickstoff und Schwefel unter ihren Bausteinen, sowie ihre bereits erwähnte Sauerstoffarmut, d. h. der geringfügige Betrag an Sauerstoff im Verhältnis zu den übrigen Bauelementen³⁾. Schließlich ist es wichtig, worauf noch später zurückzukommen sein wird, daß die Ausscheidungen des menschlichen und tierischen Körpers stets von reichlichen Mengen aus dem Verdauungsapparat stammender Bakterien begleitet sind (unter denen auch Krankheitserreger anwesend sein können), und daß sie ebenso wie verschiedene, dem Abwasser überantwortete Speisereste und ähnliche Abfälle einen günstigen Nährboden zur Entwicklung und Vermehrung zahlreicher Arten von Bakterien und anderen Kleinlebewesen abgeben.

Diese charakteristischen Merkmale der organischen Stoffe in städtischen Abwässern bedingen Mißstände, die je nach den örtlichen Verhältnissen, zu denen insbesondere die Wasserführung und die Art der Nutzung des Vorflutwassers (Fischerei), sowie die klimatische Lage gehören, bald in dem einen, bald in dem anderen Sinn sich geltend machen können. Die auftretenden Mißstände können hygienischer, ästhetischer oder wirtschaftlicher Art sein und sind meist nicht scharf voneinander zu trennen, da oft das eine auf das andere von Einfluß ist. Die Anwesenheit von Darmbakterien und die Möglichkeit der Verschleppung von Krankheitserregern ist in erster Linie eine hygienische Gefahr. Eine solche ist aber auch allgemein durch Verschlechterung der Trinkwasserversorgung gegeben, wenn die schädlichen Stoffe des Abwassers unmittelbar oder irgendwie mittelbar in dasjenige Wasser gelangen, das letzten Endes als Trinkwasser Verwendung finden kann. Einen hygienischen sowohl als auch einen ästhetischen Mißstand bedeuten insbesondere Gerüche, die dem Abwasser entströmen, die stets durch schwefelhaltige Gase verursacht sind, was schon hier festgehalten werden möge. Ästhetisch beleidigend ist der Anblick im Wasser schwimmenden Unrates, wobei zu beachten ist, daß das Gefühl des Ekels als Warnungsmittel der Natur vor hygienischer Gefahr gelten darf. Sinngemäß sind Ablagerungen von Abwasserschlamm im Vorfluter hygienisch-ästhetisch betrachtet ebenso verwerflich, wie sie durch Verengung des Flußquer-

³⁾ Zur Erläuterung dieses für die Abwasserreinigung hochwichtigen Sachverhaltes sei darauf hingewiesen, daß die sauerstoffsatte Verbindung des Kohlenstoffes mit 2 Atomen Sauerstoff, Kohlensäure CO_2 , genannt, ist. Diese besteht aus 1 Gew.-Teil Kohlenstoff und rd. 2,67 Gew.-Teilen Sauerstoff, der letztere beträgt 72,6 Gew.-% der Gesamtmasse. Tierisches Eiweiß hingegen, etwa der Formel $\text{C}_{204} \text{H}_{322} \text{N}_{52} \text{O}_{80} \text{S}_4$, weist einen Gehalt von nur rd. 22,8 Gew.-% Sauerstoff auf. Sollte obige Verbindung, deren Riesenmolekel 646 Atome enthält, vollständig sauerstoffgesättigt werden, wobei unter Spaltung des Zusammenhanges der Kohlenstoff zu Kohlensäure CO_2 , der Wasserstoff zu Wasser H_2O , der Stickstoff zu Salpetersäure N_2O_5 und der Schwefel zu Schwefelsäure SO_3 „oxydiert“ werden müßte, so würde zu den bereits vorhandenen 66 eine Zufuhr von weiteren 659 Atomen Sauerstoff erforderlich werden.

schnittes und aus anderen Gründen schädlich sein können. Von den wirtschaftlichen Mißständen sind vor allem die der Fischerei durch Einleiten ungereinigter Abwässer erwachsenden Schäden zu nennen, die ursächlich meist auf die Sauerstoffarmut der organischen Abwasserstoffe zurückzuführen sind. Daneben kann aber auch die Minderung der Wasserbeschaffenheit für gewisse gewerbliche und landwirtschaftliche Zwecke sowie für Freibäder und die Wertminderung angliegender Grundstücke wirtschaftlich von Belang sein.

V. Veränderungen in der Beschaffenheit der Abwasserstoffe

1. Allgemeines

Die vorstehend kurz angedeuteten, aus der Beschaffenheit der Abwasserstoffe herrührenden Mißstände erklären sich dadurch, daß diese Stoffe sich bei den in gemäßigten und warmen Zonen obwaltenden Klimaverhältnissen rasch verändern. Dies betrifft in erster Linie die organischen Stoffe; einige der mineralischen können in gewisser Richtung in Mitleidenschaft gezogen werden. Diese Veränderungen setzen gleich beim Entstehen des Abwassers ein, sie bestimmen die Reinigungsvorgänge und finden gegebenenfalls noch im Aufnahmegewässer ihre Fortsetzung. Sie werden begünstigt durch Feinverteilung der Substanz, verlaufen daher am stärksten und schnellsten in echter Lösung.

Letzter Grund aller stofflichen Veränderungen ist stets der unterschiedliche elektrische Ladungssinn der in Wechselwirkung gelangenden Atome der gegebenen Stoffe, der sich als die sog. „chemische Anziehung“ äußert, die an „Valenzen“ (vom Atombau abhängige Verbindungszahlen) gebunden ist. Wechselwirkung von aufeinander „reagierenden“ Stoffen hat stets eine Bewegungsfreiheit ihrer Molekeln und deren innige Annäherung zur Voraussetzung und findet demgemäß im gelösten Zustand des Reaktionsgenossen bevorzugt statt. Sie ist bezüglich der Raschheit und Vollständigkeit ihres Ablaufes von verschiedenen Faktoren abhängig, wie Temperatur, Druck, Konzentration, und kann u. U. in mannigfacher Weise gefördert werden (Beschleuniger, Katalysatoren).

Bei Stoffveränderungen im Abwasser sind zweierlei Reaktionsarten zu unterscheiden:

1. Solche, bei denen die Stärke der chemischen Anziehungskraft unter den obwaltenden Verhältnissen ausreicht, um die Stoffumsetzung, die zu neuen Atomgruppierungen, d. h. zu neuen Stoffmolekeln führt, in kurzer Zeit zu bewirken, wie dies z. B. bei der Vereinigung von Säuren und Laugen zu Salzen oder bei der Ausfällung eines wasserunlöslichen Stoffes durch Zusammentreffen zweier im Wasser gelösten der Fall ist. Solche Reaktionen sind „chemische“ im engeren Sinn, ihrer bedient sich die ganze Chemie der toten Stoffe.

2. Solche, die zwar ebenfalls „rein chemisch“ vor sich gehen, jedoch nur sehr langsam, die aber durch Mittel der lebenden Zelle außerordentlich beschleunigt werden können. Diese Mittel sind gewisse Stoffe, die nur die lebende Zelle erzeugt und die außerhalb der Zelle künstlich nicht nachgemacht werden können. Der Vorgang, in den die in der Zelle erzeugten Stoffe als beschleunigende Mittler eingeschaltet werden, ist nun allerdings an sich ein „chemischer“. Da er aber an die Lebenskraft oder Lebenstätigkeit gebunden ist, so wird er „biochemisch“ oder „biologisch“ genannt.

2. Chemische Reaktionen

Sowohl die chemischen wie die biochemischen Veränderungen der Abwasserstoffe können, planmäßig überwacht, für das Ziel der Abwasserreinigung nutzbar gemacht werden, so z. B. die ersteren zur vermehrten Abscheidung der ungelösten Stoffe, während auf den letzteren die ganze sogen. biologische Abwasserreinigung sowie die Schlammausfäulung beruht.

Die chemischen wie die biochemischen Vorgänge werden bei der Abwasserreinigung wie bei allen stofflichen Umsetzungen des irdischen Lebensbereiches vom Verhältnis der Stoffe zu einem ihrer wichtigsten, dem Sauerstoff, beherrscht. Der Sauerstoff umgibt in der atmosphärischen Hülle die Erde und dringt tief in deren Kruste ein. Er hat das Bestreben, sich mit allen anderen Stoffen zu verbinden, d. h. Oxyde zu bilden, wie solche z. B. in den gewaltigen Sandstein-, Ton-, Erzlagern, die in geologischen Zeitabschnitten entstanden sind, und vor allem im Wasser, das ein Oxyd des Wasserstoffes ist, zu erblicken sind. Die Vereinigung mit Sauerstoff findet unter Wärmeabgabe statt und führt zu dauerhaften Verbindungen. Die Loslösung vom Sauerstoff, „Reduktion“ genannt, ist nur unter Wärmezufuhr möglich (z. B. Gewinnung der Metalle aus Erzen) und führt zu unhaltbaren (labilen) Stoffen, weil solche dem erneuten Angriff des Sauerstoffes unterliegen (z. B. Rosten des Eisens). Bei Lebensvorgängen von Organismen spielen Oxydations- und Reduktionsreaktionen ineinander (bei der Atmung wird „oxydiert“, beim Aufbau der Leibessubstanz „reduziert“), doch überwiegt im großen und ganzen die Reduktion, daher der Wärmebedarf eines jeden Organismus (vgl. Abb. 6 und 7).⁴⁾

⁴⁾ F. Sierp, Wasser und Luft I. Teil, Technologisches Wassers, Handbuch der Lebensmittelchemie. 8. Bd., S. 222. Berlin 1939, Julius Springer. Ein anderes Kreislaufschema veröffentlicht L. Metcalf und H. P. Eddy, American sewerage practice. 3. Bd. 3. Aufl., S. 45. New York und London 1935, McGraw-Hill Book Company, Inc.

3. Biochemische Veränderungen.

Die organischen Abwasserstoffe sind meist Reduktionsergebnisse aus dem Zerfall pflanzlicher und tierischer Stoffe. Durch Berührung mit Sauerstoff unterliegen diese Stoffe der Oxydierung, die indes ohne Mithilfe eines „Beschleunigers“ nur mehr oder weniger langsam verläuft (vgl. das langsame Rosten des Eisens an der Luft). Die Natur stellt in den kleinsten ihrer Organismen,

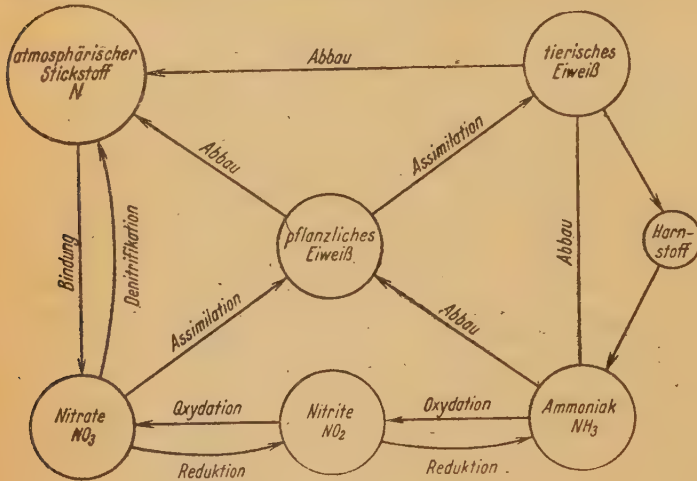


Abb. 6. Kreislauf des Stickstoffes (nach Fuller).

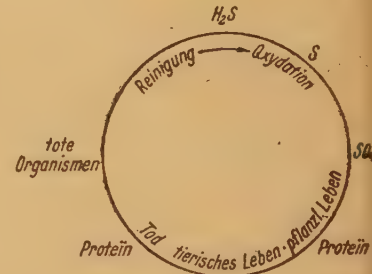


Abb. 7. Kreislauf des Schwefels (nach Sierp).

den Bakterien, hervorragende Oxydierungsbeschleuniger zur Verfügung, die aus der Kupplung der Abwasserstoffe mit Sauerstoff ihre eigene Lebensenergie in Gestalt der freiwerdenden Wärme gewinnen. Voraussetzung hierbei ist, daß im Abwasser Sauerstoff gelöst ist und daß er sich in dem Maße im Wasser wieder löst, in welchem ihm die Bakterien das Wasser entziehen, um ihn mit den organischen Stoffen umzusetzen. Fehlt es an gelöstem Sauerstoff im Wasser, dann holen sich die Bakterien solchen aus den bereits vorhandenen Oxyden, dann werden die Abwasserstoffe noch weiter reduziert, und zwar auf Kosten der Wärme der Bakterien, die bei diesem Vorgang eine anstrengende Arbeit zu leisten haben. Die bakterielle Oxydierung ist eine „nasse Verbrennung“, auf ihr beruht die biologische Reinigung des flüssigen Anteils des Abwassers. Die bakterielle Reduktion ist eine „nasse Heizung“, auf ihr beruht die Ausfäulung des Klärschlammes. Neben den toten und abgestorbenen Stoffen beherbergt städtisches Abwasser stets auch lebende Organismen aus dem Pflanzen- und Tierreich, die teils, wie oben gezeigt wurde, als Begleiter der verschiedenen Abfallstoffe, teils nachträglich aus unkontrollierbaren Quellen einschließlich der Luft (Windzutragungen) ins Abwasser gelangen, wo sie meist günstige Ernährungsbedingungen vorfinden.

Zu diesen Organismen gehören in erster Linie Bakterien, ferner Protozoen (Urtierchen), Würmer, Fliegenlarven, einige niedere Pilzarten u. a. m. Im Aufnahmewasser kommen noch Algen und

höhere Wasserpflanzen sowie zahlreiche Tierarten bis hinauf zu Muscheln, Fischen, Wasservögeln usw. hinzu.

Für das Schicksal und die Reinigung des Abwassers sowie für die Ausfäulung des Klärschlammes sind die wichtigsten Organismen die Bakterien.

Man unterscheidet parasitische und saprophytische Bakterien. Erstere finden ihre günstigsten Lebensbedingungen in den Organen von Mensch und Tier; außerhalb derselben pflegen sie bald zu verkümmern, wenn sie nicht innerhalb gewisser Zeit erneut den Zutritt zu solchen Organen erlangen. Diese Bakterienarten, zu denen z. B. die des Typhus, der Ruhr,

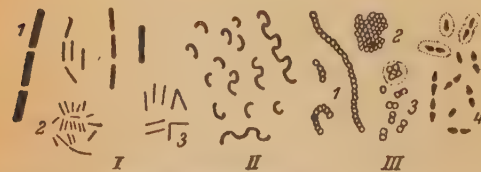


Abb. 8. Verschiedene Bakterienformen:

- I. Stäbchen („Bazillen“): 1. Milzbrand, 2. Typhus, 3. Diphtherie
- II. Schraubenformen („Vibrionen“).
- III. Kugelformen („Kokken“): 1. Ketten („Streptokokken“)

2. Häufchen („Staphylokokken“), 3. Doppelkokken (Tripper), 4. Lanzettförmige Doppelkokken (fieberhafte Lungenentzündung).

der Cholera usw. gehören, sind für die Abwasserreinigungsvorgänge bedeutungslos, sie können aber als Krankheitserreger die Gefahr der Seuchenschleppung auf dem Wasserwege heraufbeschwören (Abb. 8). Saprophytische Bakterien (Fäulnispilze) dagegen ernähren sich von toter oder abgestorbener organischer Substanz, sie sind es, die bei der Abwasserreinigung

eine wichtige Rolle als Beschleuniger der Abbauvorgänge spielen. Das eigentliche Charakteristikum der pathogenen infektiösen Bakterien, der Parasiten, gegenüber den in der Natur vorhandenen, an Zahl weit überwiegenden, nicht pathogenen Mikroorganismen, den Saphrophyten



Abb. 9. Zellteilung.



Abb. 10. Sporen.

ist, daß sie sich im lebenden menschlichen oder tierischen Organismus spontan vom einzelnen Individuum bis zu der zur Auslösung von Krankheitserscheinungen nötigen Menge vermehren können. Die Bakterien gehören, systematisch betrachtet, dem Pflanzenreich an (Spaltpilze); in ihren Wirkungen weisen sie aber mehr tierischen Charakter auf und sind daher wohl am besten als Grenzorganismen zwischen Pflanzen- und Tierreich aufzufassen. Sie bestehen im wesentlichen aus mikroskopisch kleinen Zellen (Säckchen), die mit einem wasserreichen Schleim (Lebensschleim, Urschleim, Protoplasma), gefüllt sind. Sie vermehren sich durch Zellteilung (Abb. 9)⁵⁾, einige Arten auch durch Absonderung sogen. Sporen (Abb. 10), d. h. widerstandsfähiger Dauerformen, die ungünstige Verhältnisse überleben und bei Wiedereintritt ihnen zusagender Lebensbedingungen sich in die normale (vegetative) Bakterienform verwandeln. Wo Bakterien günstige Daseinsbedingungen vorfinden, bilden sie rasch Anhäufungen (Kolonien), die, wenn sie groß genug geworden sind, dem freien Auge sichtbar werden (Abb. 11).

Einen brauchbaren quantitativen Ausdruck für die Vermehrungsenergie liefert die (leicht auszuführende) Bestimmung der Generationsdauer, d. h. derjenigen Zeit, die zwischen der Entstehung einer Bakterienzelle und ihrer vollendeten Teilung in zwei neue Individuen verstreicht. Diese kann auf Grund folgender Ueberlegungen bestimmt werden.

Ist a die Zahl der Bakterien in der Aussaat, b die Zahl der Keime in der (nach einer bestimmten Zeit T gewonnenen) Ernte, n die Zahl der (während der gleichen Zeit T) aufeinander gefolgten Generationen, so ist mit Berücksichtigung der Tatsache, daß die Vermehrung stets durch Zweiteilung geschieht:

$$b = a \cdot 2^n$$

$$n = \frac{\log b - \log a}{\log 2}$$

Dann ist die Generationsdauer = $\frac{T}{n}$. Beispiele für die Generationsdauer sind:

Bazillus:	Nährmedium:	Generationsdauer:
Cholera	Fleischwasserpeptonzuckerlösung bei 37°	29–33½ min.
Typhus	Bouillon bei 37°	19–40 min.
Coli	Bouillon bei 37°	23½ min.
Coli	Bouillon bei 22°	rd. 90 min.

Bei der Abwasserreinigung hat man es hauptsächlich mit zweierlei Formen von Bakterienkolonien zu tun: im Wasser schwebende Flocken des sogen. „belebten Schlammes“ und auf fester Grundlage aufwachsenden hautartigen Ueberzügen (sogen. biologischer Rasen der Tropfkörper, Abb. 12). In solchen Kolonien befinden sich die Bakterien in eine wasserreiche organische Masse eingebettet, die gleichsam das Siedlungsgebiet darstellt und in der auch gewisse Nährstoffvorräte für den unmittelbaren Bedarf und als Reserve für den Fall zeitweise ausbleibender Nahrungszufuhr aufgespeichert sind. Solche, auch „Zoogloën“ genannte Bakteriensiedlungen beherbergen meist auch verschiedene Begleitorganismen, besonders Protozoen, die

⁵⁾ Die Abb. 9–17 sind aus H. Bach, Die Abwasserreinigung, 2. Aufl. München und Berlin 1934, R. Oldenbourg.

teils den Bakterien das organische Futter streitig machen, teils aber sich als Bakterienverzehrer betätigen und dadurch einer Bakterienübevölkerung vorbeugend, den stetigen Nachwuchs und die Wirksamkeit der Bakterien sichern (Gleichgewicht der Natur). Im biologischen Rasen, zu dem die Luft unmittelbar Zutritt hat, pflegen sich auch meist Würmer, Fliegen- und Insektenlarven und dergl. anzusiedeln, die sich nebst den Protozoen an der Verzehrer der erlangbaren organischen Stoffe beteiligen und die Unterbettung zur Niederlegung ihrer Eier benutzen.

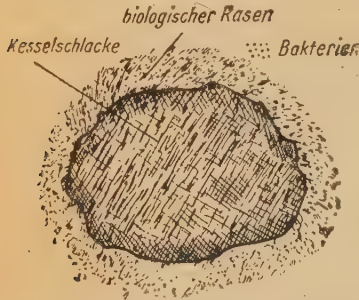


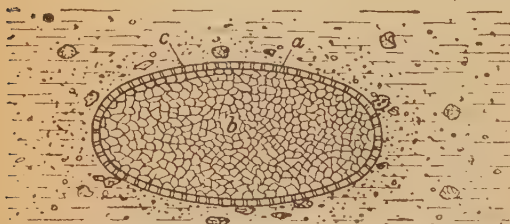
Abb. 12. Schematische Darstellung eines Brokenskesselschlacke, der mit Bakterienrasen („biologischem Rasen“) überzogen ist.

Treffen Bakterien auf halb feste wasserreiche Massen, z. B. Kotballen so wachsen die Kolonien in solche hinein, wobei im Verein mit der stofflichen Abbauwirkung der Bakterien eine rasche Zerkleinerung der betreffenden Massen stattfindet.

Bakterien sind empfindlich sowohl gegen stärkere Säuren, wie auch gegen Laugen (Alkalien). Sie können daher nur in einem wässrigen Mittel gedeihen, dessen Säure- und Laugenstärke (Wasserstoffionenkonzentration) nicht weit vom Neutralpunkt (pH-Wert = 7,0) liegt. Durch Austrocknen gehen sie zu Grunde. Eine Reihe verschiedener Chemikalien tötet sie ab oder lähmt ihre Tätigkeit (Desinfektionsmittel, Entkeimungsmittel). Sie sind meist in weiten

Temperaturgrenzen lebensfähig (von etwa 70° bis weit unter 0°); doch ist ihre merkliche Lebensfähigkeit i. d. R. an einen mehr oder minder beschränkten Temperaturbereich gebunden.

Die Nahrungsaufnahme und die Ausscheidung der Umsatzstoffe findet bei den Bakterien nicht wie bei höheren tierischen Organismen durch je besondere Organe statt, sondern beides wird durch die den Zellenschleim umschließende Zellhaut besorgt (Abb. 13 und 14). Diese ist im



- Gasstoffteilchen die am leichtesten durch die Poren eindringen
- gelöste Stoffteilchen, die ebenfalls durch die Zellhautporen passieren
- Kolloide Stoffteilchen dringen durch die Zellhautporen nicht ein
- ungelöste Schwebestoffe

Abb. 13. Vorstellungsbild einer Bakterie im Wasser, das mit Stoffteilchen verschiedener Größenordnung durchsetzt ist.

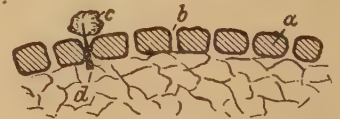


Abb. 14. Vorstellungsbild: Das Stoffteilchen c ist zu groß, um durch die Poren der Zellhülle in das Innere der Zelle zu gelangen, es wird durch den Spaltstoff (Enzym) d, der aus dem Lebensschleim ausgesondert wird, zerkleinert.

physikalischen Sinne eine halbdurchlässige Membran, d. h. sie kann nur von Wasser und kleineren Molekeln in diesem echt gelösten Stoffe durchdrungen werden, während größere Molekel und erst recht Kolloide und ungelöste Teilchen durch die äußerst feinen Poren dieser Membran nicht

schlüpfen können. Wenn nun die kleinstmolekularen gelösten Stoffe, die die Zellhaut durchläßt, für die Ernährung der Bakterien nicht geeignet sind oder nicht ausreichen, so scheidet der Zellschleim ätzende, flüssige Stoffe, sogen. Enzyme (Fermente) aus, die durch die Zellhaut nach außen treten und die zu großen Molekeln der erwünschten Stoffe, die sie außerhalb der Zelle vorfinden, so weit in kleinere Molekeln zerspalten, daß letztere nunmehr, vom Zellschleim angesaugt, durch die Poren der Zellhaut schlüpfen können.

Ebenso werden die verbrauchten, nicht in den Aufbau des Zellschleimes eingehenden Stoffe in dünner, wässriger Lösung oder als Gase durch die Zellhaut nach außen befördert, während die in der Zelle aufgebauten größeren Molekel in jener verbleiben.

In diesem Zusammenhang sei auf den früher nicht seltenen Irrtum hingewiesen, die Enzym- (oder Ferment-) Wirkung als mit der Gärwirkung völlig identisch anzusehen, was vielfach daher kam, daß der gleiche Mikrob gleichzeitig Enzym- und Gärwirkung auszuüben vermag. Der grundsätzliche Gegensatz zwischen beiden Arten von Prozessen besteht trotz ihrer äußeren Ähnlichkeit in Folgendem: die Fermentwirkung ist nicht an das lebende Plasma direkt gebunden und dient dem Mikroben niemals als Energiequelle; ihr Träger ist ein von dem lebenden Plasma erzeugter Stoff, der, selbst leblos und von den lebenden Mikroben trennbar, auch im isolierten Zustand seine Wirkung ungestört selbständig fortsetzt. Die Energiewirkung steht also völlig außerhalb des Lebensprozesses. Die Gärwirkung dagegen ist eine unmittelbare Funktion des lebenden Plasmas und dient demselben als Energiequelle, geradeso wie die Ernährung und Sauerstoffatmung. Die Gärwirkung ist also der Lebensprozeß selbst unter bestimmten äußeren Bedingungen des Nährsubstrates.

Im Innern des Zelleibes herrscht ein von der Natur und Konzentration der gelösten Stoffe abhängiger osmotischer Druck (Abb. 15), der den Protoplasten innig an die Zellwand angeschmiegt erhält. Unter normalen Verhältnissen befindet sich dieser Innendruck (die Turgorkraft des Zelleibes (Abb. 16 links) im Gleichgewicht mit dem von außen auf die Zellmembran wirkenden

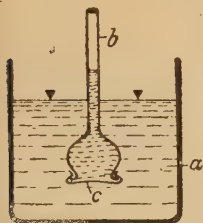


Abb. 15. Osmose. Die salzige Flüssigkeit im Trichter saugt Wasser aus dem Außengefäß an, dehnt sich infolgedessen aus und steigt über den Wasserspiegel im Außengefäß. a Gefäß mit reinem Wasser b Glasrohr unten zu einem Trichter erweitert. c für Wasser durchlässige, für gelöste feste Stoffe undurchlässige Membran.

osmotischen Druck des äußeren Mediums. Langsame Veränderungen dieses Außendruckes (durch allmähliche Konzentrationsveränderung des Nährmediums) können ohne morphologische Veränderung des Protoplasten ausgeglichen werden, teils durch Diffusion (Abb. 17), teils durch kompensatorische zelleigene Steigerung der Turgorkraft (durch Bildung osmotisch wirksamer Stoffwechselprodukte, Säuren usw.). Bei starken und plötzlichen Veränderungen des osmotischen äußeren Druckes hingegen (insbesondere bei Übertragung von einem Nährmedium auf ein anderes von gänzlich abweichender Konzentration) treten bemerkenswerte morphologische Veränderungen auf: Plasmolyse und Plasmoptyse. Die Plasmolyse, d. h. das Zurückweichen des Protoplasten von der Membran unter gleichzeitiger Kontraktion und Verdichtung zu einem oder mehreren stärker lichtbrechenden Körper kommt unter dem Einfluß wasserentziehender Mittel (Salzlösungen, Glycerin) im äußeren Medium zustande. Vorbedingung ist dabei, daß die Membran für

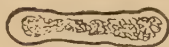


Abb. 16. Bakterien im Zustand des „Turgor“ (links) und der „Plasmolyse“ (rechts).

Wasser und den betr. gelösten Stoff in ungleichem Grade durchgängig ist. Die Membran kommt durch starke Plasmoptyse, d. h. die Ausstoßung („Auspeisung“) des Zellplasmas aus der Zell-

Erhöhung des Innendruckes zustande und stellt also das gerade Gegenteil der Plasmolyse dar.

Die Eigenschaft der Zellhaut als halbdurchlässige Membran hat zur Folge, daß die von ihr umschlossene, vom Wasser umgebene Zelle den Gesetzen des osmotischen Druckes unterworfen ist. Ist also die Außenflüssigkeit dünner als die im Zellschleim, d. h. sind weniger gelöste Stoffe in jener enthalten als in dieser, so ist der osmotische Druck nach der Zelle hin gerichtet, der Zellschleim saugt Wasser von außen an und der Zellsack wird prall gefüllt. Dieser Zustand der Zelle wird Turgor (Turgeszenz) genannt (Abb. 16 links); er bedeutet den normalen gesunden Lebenszustand der Bakterie, von dem ihre Wirksamkeit abhängt. Ist jedoch umgekehrt die Außenflüssigkeit hinsichtlich der gelösten Stoffe konzentrierter als die im Zellschleim, so bewirkt der entgegengesetzt gerichtete Druck ein Abwandern des Wassers aus der Zelle nach außen und es tritt infolgedessen eine schädliche die normalen Funktionen der Bakterien hemmende bis ganz aufhebende Schrumpfung des Zellschleimes, der Zustand der sogen. Plasmolyse (Abb. 16 rechts) ein. Die Bakterien „trocknen ein“, obgleich sie von Wasser umgeben sind. Dies findet z. B. in stark versalzenem Wasser statt und erklärt im übrigen die konservierende, d. h. die Bakterientätigkeit lahmlegende Wirkung von Salz oder Zucker auf Nahrungsmittel. Stark mit Salzen (z. B. aus gewerblichen Abläufen) beladene Abwässer bereiten deshalb bei der biologischen Reinigung Schwierigkeiten, wie andererseits die Ausfaltung des Schlammes im versalzten Faulraum viel längere Zeit in Anspruch nimmt oder überhaupt nicht zum Ziele führen kann.

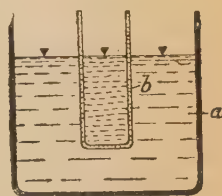


Abb. 17. Diffusion. a Gefäß mit reinem Wasser, b durchlässiger Tonzylinder mit Kochsalzlösung gefüllt.

Während bei höheren tierischen Organismen die Aufnahme der Nahrung in gewissen Zeitabständen stattfindet, zwischen denen Pausen der Sättigung und Verdauung liegen, stellen die Nahrungseinnahme und die Beseitigung der Verdauungsrückstände (einschl. der Veratungsprodukte) bei Bakterien fließende Vorgänge dar, die ohne Unterbrechung vor sich gehen. Dies ist im Einklang mit dem Fehlen je besonderer Organe für die beiden Funktionen und darin zeigt sich auch die Verwandtschaft der Bakterien mit dem Pflanzenreich, in dem i. a. das Gleiche der Fall ist.

Diese Fähigkeit der Bakterien zur ununterbrochenen Nahrungsaufnahme und damit zur fließenden Verarbeitung der ihnen zugeführten Stoffe ist von besonderer Wichtigkeit für das Verhältnis der Bakterienwirkung bei den Abwasserreinigungsvorgängen.

Die in die Bakterienzelle hereingenommenen Molekeln gelöster Nährstoffe werden hier durch die vom Zellschleim produzierten Enzyme (Spaltstoffe) aufgespalten, wobei die Molekelzerlegung sich bis auf das Freiwerden der einzelnen Atome erstrecken kann. Aus den so gewonnenen Bausteinen formt die Bakterie durch ihre Lebenskräfte (die letzten Endes dem Betrieb einer che-

mischen Fabrik vergleichbar sind) diejenigen neuen organischen Stoffe, die sie zum Aufbau und zur Erneuerung ihrer eigenen Leibsubstanz benötigt und scheidet die Umsatzreste in der oben dargelegten Weise aus der Zelle aus.

Bei diesen Vorgängen bedarf die Bakterie der lebenspendenden Wärme als motorischer Energiequelle. Diese Wärme gewinnt sie aus der Verbindung des gelöst hereingenommenen oder des herausgespaltenen Sauerstoffs mit anderen Spaltstücken oder Elementen des verfügbaren Nährstoffes, also aus der in der Zelle stattfindenden Oxydierung, die eine wärmeliefernde (exotherme) Reaktion darstellt. Tritt mit dem Wasser reichlich gelöster Sauerstoff in die Zelle, den die Bakterie unmittelbar verwenden kann, so gestaltet sich ihre Wärmeversorgung, d. h. die Speisung ihrer Lebensenergie, recht einfach, da es dann an „Heizwind“ nicht mangelt. Man spricht dann vom *aeroben* (griechisch *aér* = Luft, *biós* = Leben) Zustand, und Bakterien, die nur unter solchen Verhältnissen gedeihen, d. h. auf Zufuhr wassergelösten Sauerstoffes angewiesen sind, werden *aerobe* (*Aerobier*), d. h. „luftliebende“ genannt. Ihre Ausscheidungsprodukte sind Oxyde, wie Kohlensäure (Kohlenstoffdioxid CO_2), Salpetersäure oder Nitrate (N_2O_5), Schwefelsäure oder Sulfate (SO_3) u. a. m. Aerobe Verhältnisse und Bakterien beherrschen die biologische Reinigung des (entschlammten) Abwassers.

Enthält das Wasser, das in die Zelle eintritt, keinen oder ungenügend gelösten Sauerstoff, dann gestaltet sich die Wärmebeschaffung der Bakterie erheblich schwieriger, sie muß dann den benötigten Sauerstoff aus, sauerstoffhaltigen Verbindungen herauspalten, sie muß diese Verbindungen ihres Sauerstoffes berauben, sie reduzieren. Reicht der so gewinnbare Sauerstoff nicht aus, dann greift die Bakterie u. U. auch Wassermolekeln an, indem sie dieselben in Sauerstoff und Wasserstoff spaltet. Der bei den Reduktionsvorgängen frei werdende Wasserstoff wird nach Maßgabe seiner Aufnahmefähigkeit mit den Elementen verbunden, die ihren Sauerstoff eingebüßt haben und die so entstehenden Reduktionsprodukte, wie Methan (Sumpfgas CH_4), Ammoniak (NH_3), Schwefelwasserstoff (H_2S), schließlich auch der nicht untergebrachte Rest des Wasserstoffes (H_2) werden aus der Zelle durch die Zellhaut ausgeschieden.

Bakterien, die die Fähigkeit aufweisen, bei Mangel an wassergelöstem Sauerstoff solchen aus seinen Verbindungen freizumachen, nennt man *anaerobe* (griech. *áneu* = ohne, *aér* = Luft, *biós* = Leben) (*Anaerobier*). Zahlreiche Bakterienstämme, wahrscheinlich die meisten, die im Abwasser vegetieren, vermögen sich sowohl aeroben wie anaeroben Verhältnissen anzupassen. Sie werden *fakultative* (umstellungsfähige, Wahlbakterien) genannt. Unter anaeroben Verhältnissen findet die Ausfäulung des Klärschlammes statt.

Wie oben gezeigt, ist unter aeroben Verhältnissen die Wärmebeschaffung für die Bakterien ein leichtes. Demzufolge sind aerobiologische Abwasserreinigungsverfahren aller Art nur wenig kälteempfindlich; ihre Leistung geht in der kalten Jahreszeit im Vergleich zur warmen nicht wesentlich zurück. Die *Anaerobier* dagegen haben einen schweren Kampf um die Lebenswärme zu bestehen. Sie müssen ja einen Teil ihrer Lebensenergie zum Herausbrechen des Sauerstoffes aus seinen Verbindungen hergeben. Äußerer Wärmerückgang trifft sie daher sehr empfindlich. Deshalb geht die Schlammfäulung, die ein anaerober bakterieller Vorgang ist, bei Kälte sprunghaft zurück und man muß Schlammfäulräume im Winter oder beim Vorherrschen kühler Temperaturen künstlich erwärmen, um die anaeroben Bakterien auf der Höhe ihrer Leistungsfähigkeit zu erhalten.

Bei der Entfernung der ungelösten Stoffe aus dem Abwasser, — die, wie oben ausgeführt, durch Frischhalten desselben stets erleichtert wird — kann die Rückbildung von sehr kleinen und daher schlecht absetzbaren Schwebestoffen zu größeren, leichter absetzbaren, mechanisch bewerkstelligt werden. Dies geschieht nach vorangegangenen Absetzen der größeren Sinkstoffe durch Anwendung von Paddeln, die das Wasser für eine gewisse Zeit in langsam rotierende Bewegung versetzen. Dadurch werden die kleinen Schwebestoffteilchen miteinander in Berührung gebracht und sie vereinigen sich zu größeren Aggregaten, die als Flocken in Erscheinung treten. Die spezifische Oberfläche dieser Flocken ist naturgemäß kleiner als die der kleineren Teilchen, aus denen sie entstanden sind, und ihre Reibungshemmung gegen das Wasser ist infolgedessen verringert, so daß sie auf Grund ihrer Wichte nunmehr zum Absetzen gebracht werden. Dieses Verfahren wird bei der neuzeitigen Abwasserreinigung vielfach angewendet (Flokkulatoren). Es wäre indes falsch, die größeren ungelösten Stoffe mit Flokkulatoren behandeln zu wollen, denn in solchem Falle würde das Umgekehrte stattfinden: die groben Teile würden zu kleineren zerschlagen werden. Ähnlich wie Flokkulatoren, jedoch weniger wirksam als diese, arbeiten ins Abwasser eingehängte Stäbe, Gitter u. dergl., die nicht ganz mit Berechtigung „Kolloidore“ genannt werden. Diese dienen als Sammelflächen für feine Schwebestoffe, die auf ihnen zu größeren Belägen anwachsen und von Zeit zu Zeit sich lösend zu Boden fallen.

Ein weitergehendes Mittel zur Vermehrung der Abscheidung der ungelösten Stoffe ist der Zusatz von Fällungsmitteln. Als solche werden im Wasser leicht lösliche Metallsalze, z. B. Eisenchlorid, Eisensulfat (Eisenvitriol), Aluminiumsulfat (Alaun) u. a. m. verwendet oder auch mit Wasser angemachter gelöschter Kalk (Kalziumhydrat). Man setzt die Fällungs-

mittel in bemessenen Mengen dem Abwasser (wiederrum folgerichtig nach vorheriger Abscheidung der gröberen Stoffe) zu. Hierbei setzen sich die betr. Chemikalien mit einigen im Abwasser stets vorhandenen mineralischen Verbindungen in ziemlich verwickelten Reaktionen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, mit dem Ergebnis um, daß aus den beiderseitigen löslichen neue unlösliche Stoffe in Gestalt geräumiger Flocken gebildet werden, deren Wichte ihr mehr oder weniger rasches Absetzen bewirkt. Diese Flocken hüllen nun die feinen Schwebestoffe des Abwassers ein und reißen sie mit sich zu Boden. Darüber hinaus kann auch ein gewisser Bruchteil der anwesenden Kolloide in die Fällungsreaktion und in den Schlamm mitgenommen werden, nicht aber die Hauptmenge der organischen Kolloide oder gar der gelösten organischen Stoffe. Auf solche bleibt die „chemische Klärung“, wie das Fällungsverfahren meist genannt wird, ohne nennenswerten Einfluß, sie kann die Fäulnisfähigkeit des Abwassers zwar etwas verringern, nicht aber entscheidend beseitigen.

Der bei den Fällungsverfahren anfallende „chemische Schlamm“ ist naturgemäß in seiner Menge erheblich vermehrt gegenüber einem durch einfaches Absetzen gewonnenen Schlamm, weil ja ein beträchtlicher Teil des Fällungsschlammes aus den durch das Fällungsmittel als solches entstandenen-ungelösten Stoffen besteht.

Will man noch ein übriges zur Beseitigung der letzten Schwebstoffreste tun, so schickt man das chemisch geklärte Abwasser durch mechanische Filter. Durch einfaches Absetzen vorgeklärtes Abwasser eignet sich meist nicht zur Filterung, weil die darin noch anwesenden schleimigen Schwebestoffe die Filterporen rasch versetzen.

Die weitgehende Beseitigung der feinen, schwer absetzbaren Schwebestoffe durch die oben angeführten Verfahren ist deshalb oft erwünscht, weil diese eine geringe Wichte aufweisenden Stoffe meist vorwiegend aus organischer, rasch in Fäulnis verfallender Substanz bestehen, deren Herausnahme aus der Flüssigkeit ihre Fäulnisfähigkeit verringert (jedoch — wie oben erwähnt — nie ganz aufhebt) und die nachfolgende biologische Reinigung erleichtert.

Obschon, wie oben dargelegt, die stofflichen Umsetzungen im Abwasser, bedingt durch die Anwesenheit der Bakterien und die leichte Angreifbarkeit der hochmolekularen organischen Verbindungen von Anfang an, d. h. schon im Abwasserleitungsnetz einsetzen, so sind sie, wenn nur für die Frischhaltung des Abwassers gesorgt wird (vgl. III), im Zuge der mechanischen und gegebenenfalls auch chemischen Klärung nicht so groß, als daß die Beschaffenheit der Flüssigkeit (vom Schlamm abgesehen) sich dadurch grundsätzlich verändern würde. Die Veränderungen beschränken sich bei frischem Abwasser im Zuge der Vorklärung auf teilweisen Zerfall der Eiweißstoffe zu Spaltstücken von noch immer beträchtlichen Molekelgrößen, auf Zerlegung gewisser mit der Harnflüssigkeit ins Abwasser gelangten Verbindungen unter teilweisem Freiwerden von Ammoniak und auf Vorgänge mehr oberflächlicher Art. Außerdem findet in größerem Umfang, abhängig von der Dauer des Aufenthaltes im Abwasserleitungsnetz und von der Bewegung des Abwassers eine Auslaugung der weichen Massen, wie Kotballen, Speisereste u. dergl. durch das Wasser mit dem Ergebnis statt, daß der Gehalt des Abwassers an gelösten (und kolloiden) Stoffen sich vermehrt. Auch können nachträgliche Abscheidungen von Flocken vorkommen, wenn die ausgelaugten Stoffe mit solchen, die bereits im Wasser gelöst waren (u.-U. aus gewerblichen Abfallflüssigkeiten herrührend), unlösliche Verbindungen eingehen. Im großen und ganzen bleibt aber das entschlammte Abwasser mit zerfallfähigen organischen Stoffen beladen und würde alsbald in stinkende Fäulnis zerfallen, wenn sein Gehalt an gelöstem Sauerstoff erschöpft sein würde. Wie bereits betont, vermag die weitergetriebene Entschlammung durch verfeinerte Mittel, wie Flokkulatoren, chemische Klärung, Filterung, die Fäulnisfähigkeit meist nur um einen Betrag herabzusetzen, der den zusätzlich entfernten organischen Schwebestoffen entspricht.

Wird nun die entschlammte Flüssigkeit ohne weitere Behandlung in das Aufnahmegewässer eingeleitet, so greifen die Vorgänge Platz, die man als „Selbstreinigung der Gewässer“ bezeichnet und die im wesentlichen biologischer Natur sind. Ist das Aufnahmegewässer wegen zu geringer Wasserführung oder aus anderen Gründen nicht fähig, unter Vermeidung örtlicher Mißstände die Selbstreinigung zu bewirken, oder muß man es wenigstens teilweise entlasten, so kommt als ergänzender Bestandteil der Kläranlage die biologische Reinigung des Abwassers in Betracht. Diese stellt im Grunde genommen nur eine örtliche und zeitliche Zusammendrängung der Vorgänge dar, die im Vorfluter über eine viel längere Zeit und über lange Flußstrecken oder große Wasserflächen ausgedehnt wird.

Bei der künstlichen biologischen Reinigung, d. h. bei planmäßigem Einsatz der Lebenskräfte der Bakterien zum Abbau der schädlichen Stoffe des Abwassers, ist oberster Grundsatz die Sicherung ausreichender Luftzufuhr zum Wasser, damit es stets so viel gelösten Sauerstoff enthält, wie die Bakterien zur Deckung ihres inneren Wärmebedarfs und zur Oxydierung der abgespaltenen Elemente der organischen Molekel benötigen. Ist diese Vorbedingung erfüllt, dann spielt sich der biologische Reinigungsvorgang folgendermaßen ab:

Die mit Bakterien bevölkerten Flocken oder Häute (vgl. oben) weisen zufolge ihrer schleimig-schwammigen Beschaffenheit eine außerordentlich ausgedehnte Oberfläche auf, teils als

Folge der Aufhebung gegensätzlicher elektrischer Ladungen zwischen den Bakterienzoozoen und den Abwasserkolloiden sowie den etwa noch anwesenden feinen Schwebestoffen, schlagen sich diese für die Bakterien nährwertigen Stoffe auf den Flocken, Häuten usw. nieder, sie werden „ausgeflockt“ und gelangen so in den unmittelbaren Einwirkungsbereich der Bakterien, den man nach der Lehre von Dunbar⁶⁾ als Adsorption (lat. adsorbere = aufnehmen) (Ansaugung) bezeichnet und der im wesentlichen physikalischer Natur ist, wird zunächst eine dünne Zone der Flüssigkeit die unmittelbar an die Bakterienkolonie angrenzt, von den Schmutzstoffen befreit. Aus den weiter ab liegenden Wasserschichten wandern nun neue Stoffteilchen in die leer gewordene Berührungszone hinein, um sich gleichmäßig im Wasser zu verteilen. Die neu eingewanderten Teilchen unterliegen ihrerseits der Adsorption und das Spiel dauert an, bis das Abwasser nach und nach die Schmutzstoffe los wird, die schließlich weitgehend an den erwähnten Oberflächen der Bakterienhaufen niedergeschlagen werden. Damit nun dieser Vorgang nicht zu lange Zeit in Anspruch nimmt, muß man dafür sorgen, daß die Bakterienkolonien mit der Masse des Abwassers in innigste Berührung gebracht werden, damit die Adsorptionskräfte jeweils nur auf ganz dünne Flüssigkeitsschichten zu wirken brauchen. Dies wird beim Belebungsverfahren dadurch erreicht, daß der ganze Reaktionsraum des Beckens, demnach also die ganze behandelte Abwassermasse mit den Flocken des belebten Schlammes durchsetzt wird und diese Flocken in ständiger Bewegung gehalten werden, so daß keine Bakterienleerräume im Abwasser entstehen, in denen die Adsorption sich verzögern könnte.

Bei Tropfkörpern, bei denen die Bakterienhäute auf fester Unterlage verankert sind, wird das Abwasser dünn verrieselt, so daß stets nur sehr dünne Schichten desselben mit den Häuten in Berührung kommen und die Adsorption in kurzer Zeit stattfinden kann.

Bei anderen biologischen Reinigungsverfahren muß das Zusammenbringen des Abwassers mit den Bakterienkolonien sinngemäß bewerkstelligt werden, um die innige Berührung der ganzen Abwassermasse mit den Bakterienhaufen und damit die möglichst vollständige Adsorption der Schmutzstoffe sicherzustellen.

Bei fortschreitender Ablagerung der Ausflockungen auf den Bakterienkolonien müßte aber die Adsorptionsfähigkeit derselben bald nachlassen, weil ihre wirksamen Oberflächen zugedeckt und an Ausdehnung verlieren würden. Hier setzt nun die Lebenstätigkeit der Bakterien ein, die — immer einen ausreichenden Gehalt des Wassers an gelöstem Sauerstoff vorausgesetzt — die ausgeflockten Stoffe laufend verarbeiten und damit die Adsorptionsfähigkeit auf der Höhe der Wirksamkeit erhalten. Die echt gelösten Stoffe finden, wie früher dargelegt, durch die halbdurchlässige Zellhaut unmittelbar Zutritt ins Innere der Zelle. Um nun auch die adsorbierten ausgeflockten, also unlöslichen nährwertigen Stoffe in die Zelle hineinzubekommen, scheidet die Bakterie ätzende Flüssigkeiten, sog. Enzyme (Spaltstoffe) aus, die die ausgeflockten, außerhalb der Zelle abgelagerten Stoffe in Lösung bringen und dadurch ihren Eintritt in die Zelle ermöglichen. Hier angelangt, werden diese Stoffe weiter zerspalten, zu einem gewissen Teil zum Aufbau der bakteriellen Leibessubstanz verwendet, im übrigen aber die Spaltstücke und Elemente mit Sauerstoff gekuppelt, wobei, wie früher dargelegt, Wärme frei wird, die der Bakterie die Lebenswärme liefert. Die so entstehenden Sauerstoffverbindungen (Oxyde) verlassen mit Wasser gelöst die Zelle im Austausch gegen neu eintretende Nahrung. Die wichtigsten Erzeugnisse dieser biologischen (biochemischen) Oxydierung sind die Kohlensäure (CO_2), Salpetersäure (N_2O_5) und Schwefelsäure (SO_3), die jedoch, da das Wasser stets einen ausreichenden Gehalt an gelösten alkalischen Stoffen aufweist, gleich beim Entstehen zu wasserlöslichen Salzen (Karbonaten, Nitraten, Sulfaten) gebunden werden; ein Ueberschuß an ungebundener Kohlensäure bleibt im Wasser gelöst oder entweicht in die Luft.

Die „Reinigung“ des Wassers als solche ist mit dem Verlust der Schmutzstoffe durch Adsorption an die Bakterienkolonien zunächst beendet. Bleibt aber das so gereinigte Wasser noch einige Zeit mit den Bakterien Schleimen in Berührung, so nimmt es die oben genannten Oxydierungsprodukte wieder auf, die nun allerdings den „reinen“ Charakter der Flüssigkeit nicht beeinträchtigen, da sie als sauerstoffsatte Verbindungen den Sauerstoffgehalt des Vorfluters nicht im ungünstigen Sinn beeinflussen können, vielmehr eine gewisse Sauerstoffreserve darstellen. Sorgt man jedoch dafür, daß die mit dem Adsorptionsgut beladenen Bakterien Schleime baldmöglichst von dem gereinigten Wasser getrennt werden und ihre oben erläuterte Wiederherstellung oder aber Zersetzung (Schlammausfäulung) in besonderen Räumen stattfindet, so enthält das gereinigte Wasser entsprechend weniger der genannten biologischen Oxydierungsprodukte. Dies richtig zu verstehen, ist besonders wichtig für die Beurteilung des Nitratgehaltes in biologisch gereinigten Abwässern. Die Anwesenheit von Nitraten in solchen bekundet, daß der Stickstoff in die höchste Oxydierungsstufe übergeführt worden ist, der biologische Reinigungsvorgang also wirkungsvoll ablief. Abwesenheit oder geringfügiger Gehalt an Nitraten braucht aber durchaus nicht das Gegenteil zu beweisen, wenn nur kein Stickstoff in sauerstoffarmer oder -leerer Bindung (z. B. als Ammoniak) im Wasser anwesend ist. Abwesenheit der biologischen

⁶⁾ Dunbar, Leitfaden für die Abwasserreinigungsfrage. 2. Aufl. S. 341 ff. München und Berlin 1912, R. Oldenburg. — F. Krütz, Adsorptionstechnik, Dresden und Leipzig 1935, Th. Steinkopf.

Oxydierungsprodukte kann oft sogar der Anwesenheit solcher vorgezogen werden, da letztere mitunter mittelbar gewisse Schwierigkeiten im Gefolge haben kann (Verkrautung der Wasserläufe infolge Düngewirkung der Nitrates, Reduktion der Sulfate zu Schwefelwasserstoff u. a. m.). Im Sinn des oben Dargelegten kann man den Betrieb einer biologischen Abwasserreinigungsanlage technisch auf hohen oder niederen Gehalt der gereinigten Flüssigkeit an Oxydierungsprodukten, insbesondere an Nitraten, einstellen. Das Belebungsverfahren ist ein typisch „nitratarmes“, weil die mit dem Adsorptionsgut beladenen Flocken des belebten Schlammes laufend von der gereinigten Flüssigkeit getrennt werden, während Tropfkörper bei schwacher Belastung nitratreiche, bei starker Belastung (nach Imhoff Spültropfkörper genannt) nitratarme Abläufe liefern, da im ersteren Fall die Bakterienhäute lange auf den Unterlagen verbleiben, im letzteren aber die verbrauchten Beläge laufend ausgespült und vom gereinigten Wasser alsbald getrennt werden.

Trink- und Brauchwässer der Städte weisen stets eine ganz leichte alkalische Reaktion auf, ihr pH-Wert liegt deutlich über 7,0. Ist dies von Natur aus etwa nicht der Fall, dann muß das Wasser „entsäuert“ werden, weil sonst bald das Leitungsnetz zerstört werden würde. Frisches Abwasser, dessen Wasseranteil ja vom Versorgungswasser gebildet wird (Abb. 1), weist dementsprechend auch eine schwach alkalische Reaktion auf, die noch dadurch deutlicher werden kann, daß schon in den Abwasserleitungen aus dem Harnstoff etwas Ammoniak abgespalten wird. Die vorgeschriebene aerobe biologische Reinigung des frisch gehaltenen Abwassers ist daher vom Anfang bis zum Ende durch eine leicht alkalische Reaktion der Flüssigkeit gekennzeichnet und der pH-Wert steigt i. d. R. im Zuge der Behandlung etwas an, weil im Wasser anwesende organische Säuren zerstört werden. Der aerob-bakterielle Reinigungsvorgang liegt also im schwach alkalischen Bereich und er ist stofflich betrachtet einheitlich ausgerichtet, da in der Reifungszeit (Einarbeitungszeit), d. h. in dem zur ausreichenden Vermehrung und Entwicklung der Bakterienkolonien erforderlichen Zeitraum keine grundsätzlich anderen stofflichen Vorgänge zu beobachten sind als später beim Betrieb der vollgereiften Anlage, diese Vorgänge vielmehr einen stetigen Fortschritt von geringer zu stärkerer Leistung aufweisen.

VI. Die Stoffveränderungen bei der Schlammausfäulung.

Weit verwickelter als bei der aeroben biologischen Reinigung der Abwasserflüssigkeit gestalten sich die stofflichen Vorgänge bei der anaeroben bakteriellen Zersetzung des Klärschlammes, die gemeinhin als Schlammausfäulung bezeichnet wird. Hier besteht ein grundsätzlicher Unterschied zwischen den anfänglichen (Einarbeitungszeit) und den späteren Produkten der bakteriellen Lebenstätigkeit. Man nimmt an, obschon dies keineswegs zwingend bewiesen ist, daß in der Reifungszeit der Schlammfäulbehälter eine andere Art Bakterien, die sog. „Wasserstoffgärer“, als später bei normaler Gärung tätig sind und daß bei der letzteren die sog. „Methanbakterien“ die Oberhand gewonnen und die Wasserstoffgärer aus dem Feld geschlagen haben. Es kann aber ebenso sein und hat eine gewisse Wahrscheinlichkeit für sich, daß die im folgenden darzulegenden Unterschiede zwischen Einarbeitungszeit und Zeit der erlangten Reife der Faulräume lediglich darauf beruhen, daß dieselben Bakterienarten nach Aufzehrung einer Gruppe von den gegebenen Stoffarten, die sie zuerst bevorzugen mögen, sich der Verwertung einer anderen Stoffgruppe zuwenden, demnach sich „umstellen“, ähnlich wie dies hinsichtlich des Sauerstoffes bei den „fakultativen“ Bakterien der Fall ist:

Die aus dem Abwasser ausgesonderten unlöslichen Stoffe, die bei ihrer Gewinnung mit Abwasserflüssigkeit durchsetzt sind, bilden in ihrer Gesamtheit eine mehr oder minder zähflüssige Masse, deren Gehalt an gelöstem Sauerstoff in kürzester Zeit erschöpft ist, weil die Bakterien ihn alsbald aufbrauchen. Die Bakterien treiben ihre Kolonien in die weichen Massen hinein und bewirken damit eine Zerkleinerung der Kotballen und dergl., die man als „Verbreiung“ der ungelösten Stoffe bezeichnen könnte. Es folgt die Verflüssigung eines Teils der ungelösten organischen Stoffe durch die Enzyme, die die Bakterien zu diesem Zweck ausscheiden, und die Hereinnahme der nun wassergelösten Substanz in die Bakterienzelle. Hier werden die Verbindungen zerlegt und ihr Sauerstoff, soweit vorhanden, als Wärmespender in Anspruch genommen, d. h. es wird damit Kohlenstoff zu Kohlensäure „verbrannt“. In der Regel genügt aber diese Sauerstoffquelle nicht und zwecks Gewinnung weiteren Sauerstoffes spalten die Bakterien auch Wassermolekel auf, so daß Wasserstoff frei wird. Der Wasserstoff aus den organischen Verbindungen sowohl wie aus dem Wasser wird mit den vom Sauerstoff beraubten Stoffgruppen und mit den freigewordenen Elementen in der Zelle gekuppelt, wobei aber noch reichlich Wasserstoff übrig bleibt, für den zunächst keine Unterbringungsmöglichkeit gegeben ist. In der Einarbeitungszeit bevorzugen nun die Bakterien offenbar Stoffgruppen, in denen kein Stickstoff enthalten ist, bzw. sie nehmen diese nur soweit in Anspruch, als dies zum Aufbau und zur Erneuerung ihrer Leibessubstanz notwendig ist. Die aus der Zelle austretenden Produkte der bakteriellen Lebenstätigkeit weisen deshalb neben Kohlensäure und einer beschränkten Menge Methan (CH_4), d. h. mit Wasserstoff gekuppelten Kohlenstoff, noch Schwefelwasserstoff (H_2S), d. h. mit Wasserstoff gekuppelten Schwefel, sowie den freigewordenen Wasserstoff auf. Dazu kommen durch die enzymatische Spaltung von Fetten frei gemachte organische Säuren, wie Essigsäure, Buttersäure, Malonsäure usw., die eben-

falls noch nicht in der Zelle weiter zerlegt worden sind. Man braucht sich nur vorzustellen, daß die anaeroben Bakterien sich zuerst auswahlweise an den Abbau derjenigen Stoffgruppen heranzumachen, mit denen sie leichtere Arbeit haben und die für ihre Energieversorgung am ergiebigsten sind, um das Uebrigere für später zurückzustellen. Im Einklang damit werden in der Einarbeitungszeit keine Reduktionsverbindungen des Stickstoffes von der Bakterienzelle ausgeschieden⁷⁾. Diese Erzeugung von Säuren (organische Säuren, Kohlensäure und Schwefelwasserstoff, der ebenfalls Säurecharakter hat) bewirkt, daß der Schlamm rasch sauer wird und der pH-Wert beträchtlich unter den Neutralpunkt (= 7,0) sinkt. Außerlich macht sich eine starke Geruchsbelästigung durch den Schwefelwasserstoff und andere durch die Gase getriebenen Geruchsstoffe, besonders Buttersäure, sowie Schäumen der Schlammmasse bemerkbar. Man nennt diese Phase „saure Gärung“ oder „Wasserstoffgärung“. Durch diese kann der Schlamm nicht zu Ende ausgefault werden, weil, wie eben gezeigt, ein Teil der Stoffgruppen noch nicht abgebaut wird. In dem Maße nun, als die bei der Wasserstoffgärung von den Bakterien beanspruchten Stoffe knapp zu werden beginnen und sich schließlich der Erschöpfung nähern, wenden sich die Bakterien gezwungenermaßen der Zerlegung und Verwertung der bis dahin aufgesparten Stoffgruppen zu. Es werden nunmehr die stickstoffhaltigen Stoffgruppen in der Zelle aufgespalten und der Stickstoff, mit Wasserstoff zu Ammoniak (NH_3) gekuppelt, wird aus der Zelle ausgeschieden. Das stark alkalische Ammoniak hebt, sobald es in genügender Menge erzeugt worden ist, die saure Reaktion des Schlammes auf und wandelt sie in alkalische; der pH-Wert steigt über den Neutralpunkt. Damit hat die Gärung aufgehört „sauer“ zu sein, sie wird zur „alkalischen“. Außer den Stickstoffverbindungen werden aber jetzt auch die organischen Säuren weiter aufgespalten, wobei als Spaltprodukte Methan und Kohlensäure auftreten. In ähnlicher Weise werden auch Zellstoff und einige andere organische Stoffe unter Lieferung von Methan aufgespalten. Die abgespaltene Kohlensäure wird, soweit sie nicht durch das Ammoniak abgebunden wird und in dieser Bindung oder in Form von Bikarbonaten im Wasser gelöst verbleibt, z. T. aber als Gas entweicht, in der Bakterienzelle ihres Sauerstoffes beraubt und der verbliebene Kohlenstoff mit Wasserstoff abermals zu Methan gekuppelt. Diese neu aus den genannten Spaltungs- und Kupplungsvorgängen sich ergebende reichliche Methanproduktion hat dieser Phase die Bezeichnung „Methangärung“ gebracht. Die Wasserstoffentwicklung schrumpft in dieser Phase auf eine geringfügige Menge zusammen oder verschwindet völlig, da der in der Zelle freigemachte Wasserstoff zur Reduktion der stets im Ueberschuß als Spaltprodukt vorhandenen Kohlensäure aufgebraucht wird und an Kohlenstoff gebunden als Methan zum Vorschein kommt. Hat die Methangärung Fuß gefaßt, so ist ein Rückfall in die saure Gärung naturgemäß nicht mehr möglich, da ja die Stoffe, die diese ernähren, bereits aufgebraucht worden sind.

Aus Vorstehendem ergibt sich, daß man, wie oben dargelegt, die Existenz zweier unterschiedlicher Bakterienarten, die sich von der sauren zur alkalischen Gärung ablösen, gar nicht anzunehmen braucht, sondern daß die Veränderung der Gärungsrichtung ebensogut durch den Wechsel und die Aufeinanderfolge der durch die Bakterien beanspruchten Nährstoffe erklärt werden kann.

Dies ist der Sachverhalt, wenn eine bestimmte Menge Schlamm auf einmal in den Faulraum gebracht und der Abbauwirkung der anaeroben Bakterien überlassen wird. Wenn nun aber zu der bereits in Methangärung begriffenen Schlammmasse neue Ladungen frischen Schlammes hinzukommen, also ein laufender Faulbetrieb eingerichtet wird, so hängt es von dem Verhältnis der Frischschlammmenge zu der Altschlammmenge ab, ob die Methangärung unverändert aufrecht erhalten werden kann oder ob ein vorübergehender Rückschlag in saure Gärung stattfindet. Das erstere ist der Fall, wenn die laufend zukommenden Frischschlammengen so gering gehalten werden, daß die entstehenden Säuren durch das Ammoniak der Methangärung mit Sicherheit abgestumpft werden; dann erscheinen eben nur die Produkte der Methangärung in der Gesamtmasse des Schlammes, allenfalls vermindert im Verhältnis der Frischschlammzusätze.

Nach amerikanischen Beobachtungen dürfen zu dem alkalisch gärenden Altschlamm nur Frischschlammzusätze gemacht werden, die nicht mehr als täglich 2% (bei bestimmten Temperaturen) der Altschlammmasse, bezogen auf die Trockenstoffmenge, betragen; dann kann der Faulbetrieb laufend ohne Gefahr eines Rückschlages in die saure Phase aufrecht erhalten werden. Sind jedoch die Frischschlammzusätze wesentlich größer, so daß die produzierten Säuren das Ammoniak überwiegen, dann ist die saure Lösung da und kann nur durch Unterbrechung der Frischschlammzufuhr oder allenfalls durch vorsichtige Alkalisierung der Schlammmasse (z. B. mittels Kalk) wieder in Gang gebracht werden. Solche von außen stattfindende Alkalisierungen sind indes i. a. nicht zu empfehlen, weil durch sie u. U. die Bakterien geschädigt werden können.

⁷⁾ Es besteht da offenbar eine Parallele zum Verlauf der Befriedigung des biochemischen Sauerstoffbedarfes (BSB), der auch deutlich in zwei Stufen in Erscheinung tritt. Die erste Stufe verarbeitet keine Stickstoffverbindungen, in der zweiten tritt die Stickstoffoxydierung in den Vordergrund.

Setzt man dem frischen Schlamm eine größere Menge methangärenden Schlamm zu, so wird nach dem Vorgesagten die Zeit der sauren Gärung, also die Einarbeitungszeit, entsprechend abgekürzt, bei ausreichend großen Mengen des Altschlammes sofort die Methangärung eingeleitet. Dieses bei Inbetriebnahme neuer Schlammfäulräume vielfach angewendete Verfahren wird oft als „Schlammimpfung“ bezeichnet. Der Ausdruck ist aber nicht ganz richtig, da man unter „Impfung“ die Einleitung einer bakteriellen Tätigkeit durch Einführen einer sehr geringfügigen Menge eines bakterienhaltigen Mediums in eine große Masse Material versteht. Bei der „Schlammimpfung“ handelt es sich aber nach dem Vorgesagten weniger um die Zufuhr von „Methanbakterien“ als vielmehr um die Zufuhr von Stoffen, aus denen nur noch die Methangärungsprodukte entstehen können.

Charakteristisch für die Methangärung ist neben der Produktion des Methangases (das mit mehr oder weniger Kohlensäure vermischt ist und auch geringe Mengen Stickstoff enthalten kann) die Abwesenheit belästigenden Geruches. Der Schwefelwasserstoff wird nämlich im alkalischen Medium an Eisen gebunden, das im Schlammwasser stets in ausreichender Menge vorhanden ist. Es entsteht so Schwefeleisen, das wasserlöslich ist und sich in sehr fein verteiltem Zustand (wahrscheinlich als Kolloid) abscheidet und die Schlammmasse durchsetzt. Diese wird durch das Schwefeleisen schwarz gefärbt (im Gegensatz zur gelb-braunen Färbung des frischen Schlammes). Die Zerstörung der Fettsäuren hat weiter zur Folge, daß das Entweichen der Gase aus der Schlammmasse nicht mehr von starkem Schäumen („Spucken“ der Fäulräume in der Einarbeitungszeit) begleitet ist.

Die vorgeschriebene Methangärung erfordert Temperaturen, die den anaeroben Bakterien die Arbeit erleichtern (vgl. das früher Dargelegte). Die günstigsten Temperaturen liegen im Bereiche von etwa 28° bis 35°, bei kühleren Temperaturen verlaufen die Vorgänge entsprechend langsamer, um bei etwa 5° fast ganz aufzuhören. Die im Schlamm anwesenden organischen Stoffe werden jedoch durch die anaeroben Bakterien nicht restlos abgebaut, vielmehr verbleiben noch Stoffe, die offenbar für die Bakterien keine zusagende Nahrung darstellen, die sie also nicht oder nur sehr langsam angreifen. Daraus ergibt sich eine „technische Grenze“ der Ausfäulung, die gelegentlich mit dem Abbau von etwa der Hälfte der organischen Substanz zusammenfällt. Die verbleibenden, schwer ausfäulbaren Stoffe können jedoch z. T. noch in den Ausfäulungsvorgang einbezogen werden, wenn man sie mit frischem Schlamm oder neuen Mengen gut gärenden Schlammes vermischt. Die Bakterien verarbeiten dann neben der ihnen zusagenden Nahrung auch eine gewisse Menge der weniger gut „verdaulichen“ (ähnlich wie „Streckung“ der Nahrungsmittel bei höheren Lebewesen).

Bei Anstieg der Temperaturen über 35° geht die Leistung der „wärmegemäßigten“ (mesophilen) Bakterien zurück, die zu große Wärme verursacht offenbar eine Ermüdung und Erschlaffung derselben. Im Temperaturbereich von über 45° bis 60° findet indes von neuem eine anaerobe Schlammgärung statt, die von besonderen Stämmen sehr wärmebedürftiger Bakterien verursacht wird, die daher „thermophile“, d. h. wärmeliebende Bakterien genannt werden. Die Vorgänge bei dieser Hitzegärung und die dabei entstehenden Produkte sind jedoch bislang noch zu wenig studiert, um hier erörtert werden zu können.

Soviel hat indes die Erfahrung ergeben, daß es unzweckmäßig ist, den frischen Schlamm der thermophilen Gärung zu unterwerfen, weil der so behandelte Schlamm im Gegensatz zum mesophil ausgefäulten übel riecht und eine schleimige Beschaffenheit annimmt, die seine Entwässerung erschwert. Inwiefern kann es in Betracht kommen, den Schlamm durch Methangärung in verkürzter Zeit vorzufäulen und in einer zweiten Stufe der thermophilen Gärung zu unterwerfen, welches Verfahren bei erheblich verkürzter Gesamtfaulzeit zu einem günstig beschaffenen Endprodukt unter vermehrter Gasgewinnung führen könnte.

Die Ausfäulung des Schlammes wirkt sich aus

- a) auf die Menge der schließlich verbleibenden Schlammmasse,
- b) auf ihre Beschaffenheit,
- c) auf die Gewinnung des brennbaren Schlammgases (Methangas).

Zu a): Der Frischschlamm, der in die Fäulräume eingebracht wird, enthält nur wenige Hundertteile Trockenstoff, der Rest ist Wasser. Dieses Wasser ist dem Schlamm teils beigemischt, teils umgibt es als festanhaltende Benetzungshäutchen die einzelnen Stoffteilchen, teils ist es aber mit diesen verquollen (geliert). Bringt man eine Schlammprobe auf ein Papierfilter, so sickert das lose beigemischte Wasser alsbald durch, auf dem Filter verbleibt aber der nach wie vor nasse Schlamm, der noch viel Wasser festhält. Man nennt den Wasseranteil, der sich nicht in der oben angegebenen Weise einfach vom Schlamm trennen läßt, sein Haftwasser. Bei der Fäulung des Schlammes wird nun sein Haftwasser zum großen Teil aus der Verquellung gelöst und in sickerbares Wasser überführt, weil die organischen Kolloide, die die Verquellung bedingen, zerstört worden sind und weil die übrig bleibende geringere Menge der Stoffteilchen eine kleinere Gesamtoberfläche aufweist und damit die Menge des Benetzungswassers verkleinert wird. Der Vorgang wird ohne weiteres verständlich, wenn man damit z. B. die Fäulnis eines Apfels vergleicht. Der faulende Apfel (und jede andere Frucht) scheidet so viel Wasser ab, daß am Ende die übrigbleibenden Reste im Wasser schwimmen.

Da nun technisch das sickerbare Wasser leicht beseitigt werden kann, so ergibt sich schon aus der Freimachung des Haftwassers eine beträchtliche Verminderung der Schlammmenge. Hierzu kommt der angenehme Umstand, daß mit der Aufhebung der Verquellung der vorher zähe Schlamm leichter fließbar wird, sich also besser pumpen läßt.

Zu b): Der ausgefaulte Schlamm verlor einen beträchtlichen Teil seines ursprünglichen Kohlenstoffgehaltes in Gestalt von Methan und Kohlensäure. Entsprechend hat sich der ursprüngliche organische Gehalt des Schlammes vermindert, er ist mehr oder weniger „mineralisiert“ worden. Die Mineralisierung des Schlammes bedeutet sowohl die Verminderung des Trockenstoffgehaltes um den zerstörten organischen Anteil, wie auch die Herabsetzung seiner Wasserbindigkeit, die unter a) gewürdigt worden ist. Die Mineralisierung ist, wie bereits oben erwähnt, nie vollständig; schwerer zersetzbare organische Stoffe verbleiben der mineralischen Masse zugemischt und pflegen gewöhnlich noch etwa die Hälfte des Gesamtgewichtes, bezogen auf den Trockenstoffgehalt, zu betragen.

Äußerlich ist für den ausgefaulten Schlamm die Abwesenheit des belästigenden, dem frischen Schlamm stets eigenen Geruches kennzeichnend. Stattdessen riecht ausgefaulter Schlamm deutlich teeig oder vielmehr nach rohem Erdöl. Dieser Umstand weist darauf hin, daß die Bildung von Erdöl in der Natur mit ähnlichen anaeroben Vorgängen der Zersetzung organischer Massen zusammenhängt, wie solche bei der Ausfäulung von Klärschlamm stattfinden.

Weitere äußere Merkmale sind: schwarzgraue Farbe vom feinverteilten Schwefeleisen herührend⁸⁾, Abwesenheit geformter Abfälle aller Art⁹⁾, krümelige Struktur (als Folge der Mineralisierung), die die Wasserdurchsickerung gestattet (im Gegensatz zur schleimig-zähen Beschaffenheit frischen Schlammes) und nach Entwässerung das Füllen der Poren mit Luft bewirkt, wodurch eine nachträgliche aerobe Einwirkung im Sinn einer „Vererdung“ der Masse, die freilich lange Zeit erfordert, einsetzt. Die Vererdung ist als weiterer — diesmal aerober — Abbau eines Bruchteils der noch verbliebenen organischen Reststoffe aufzufassen und führt zur Anreicherung der Masse mit aeroben Bakterien, die dem landwirtschaftlichen Kulturboden erwünscht sind. Darauf beruht ein gut Teil der Eignung ausgefaulten Schlammes als Düngemittel.

Zu c): Die Entstehung der Einzelgasarten in dem Schlammgasgemisch ist oben erläutert worden. Wertvoll ist nur das Methan, das bei ausreichender Luftzufuhr zu Kohlensäure und Wasser (Dampf) verbrennt. Bei verminderter Luft(Sauerstoff-)zufuhr wird gegebenenfalls nur der Wasserstoff verbrannt und der Kohlenstoff scheidet sich in feinsten Verteilung ab (Rußgewinnung). Die Kohlensäure im Schlammgas ist als unnützer Ballast anzusehen; sie kann durch Waschen des Gases unter Druck im Wasser weitgehend beseitigt werden. Der Stickstoffgehalt im Schlammgas scheint im wesentlichen aus der im Wasser gelösten Luft herzuführen. Bei Erwärmung des Schlammes im Faulbehälter wird der Luftstickstoff (der Sauerstoff ist ja bereits verbraucht worden) teilweise ausgetrieben.

VII. Die Vorgänge bei der Behandlung von fauligem Abwasser

Die Vorgänge, die sich bei der Behandlung von fauligem Abwasser abspielen, sollen mit Absicht erst an dieser Stelle erörtert werden, weil sie nach Darlegung der bei der Schlammfäulung stattfindenden Stoffveränderungen leichter verständlich werden.

Ist das Abwasser im Leitungsnetz schon faulig, weil der gelöste Sauerstoff weggezehrt ist und neuer nicht oder nicht in ausreichender Menge hinzukommt, so setzt ebenso wie im Schlammfäulraum die saure Gärung mit all ihren Begleiterscheinungen ein, nur, entsprechend der stärkeren Verdünnung, in milderem Ausmaß. Der Gestank kann indessen sehr belästigend sein, da schon sehr kleine Mengen in die Luft entweichenden Schwefelwasserstoffes dieselbe verpesten können. Die bakteriellen Vorgänge sind jedoch, solange das Abwasser beim Fließen mit Luft in Berührung bleibt, nicht so streng einheitlich wie im Schlammfäulraum, da an der mit der Luft in Berührung stehenden Wasserschicht aerobe Bakterien eine Daseinsmöglichkeit finden. Erst wenn bei stark verlangsamter Bewegung des Abwassers (z. B. in Staustrecken des Leitungsnetzes oder in Faulräumen) eine Schwimmdecke sich ausbildet, die den Zutritt der Luft absperrt (und auch den Schwefelwasserstoff z. T. abbinden kann), werden die Vorgänge einheitlich anaerob. Während nun in den Schlammfäulräumen die gärende Masse solange verweilt, bis nach der sauren die Methangärung Fuß gefaßt hat und zu Ende geführt worden ist, kann eine solche Behandlungsweise für die Gesamtmenge des Abwassers oder für dessen flüssigen Anteil gar nicht in Betracht kommen, da hierzu Räume von ungewöhnlichen Ausmaßen erforderlich sein würden. Das Abwasser kann sich also in Faulräumen nur viel zu kurze Zeit aufhalten. In dieser Zeit findet eine weitgehende Zerkleinerung und teilweise Zerschleimung und Verflüssigung der ungelösten Stoffe statt, während andererseits Schlamm zu Boden fällt, der aber durch Faulnisgas gehoben wird und abermals absinkt, wodurch die ganze Masse des Abwassers mit den Produkten der sauren

⁸⁾ Dieses ist leicht nachweisbar. Begießt man angefaulten Schlamm mit einer Säure (z. B. Salzsäure), so wird das Schwefeleisen zersetzt und Schwefelwasserstoff, kenntlich durch den Geruch, in Freiheit gesetzt. Es ist dies der Schwefelwasserstoff, der bei Anwesenheit von Ammoniak an Eisen gebunden worden ist.

⁹⁾ Wichtig aus ästhetischem Gesichtspunkt, da die Herkunft des Materials nicht augenscheinlich wird und ein Ekelgefühl nicht aufkommt.

Gärung durchsetzt wird. Das Ergebnis ist ein stinkender Abfluß, der im Aufnahmegewässer womöglich mehr Mißstände verursachen würde, als wenn das rohe Abwasser unmittelbar demselben zugeleitet werden würde. Eine derartige, nicht zu einem klaren Ende geführte Fäulung des Abwassers kann denn auch nur in Frage kommen, wenn die faulige Flüssigkeit vor der Uebergabe an den Vorfluter aerob-biologisch nachgereinigt wird. Hierbei findet aber eine verhältnismäßig größere Mehrbelastung der biologischen Reinigungsstufen im Vergleich zu frisch gehaltenem und rechtzeitig entschlammtem Abwasser statt und es entstehen ernste örtliche Unzuverlässigkeiten durch den Gestank auf der Anlage.

Eine spürbare Ausfäulung des Abwassers muß daher schon in den Abwasserleitungen durch richtige Planung und zweckentsprechenden Betrieb des Entwässerungsnetzes hiantgehalten werden: Vermeidung zu umfangreicher Leitungsnetze und von Stauungen in ihnen, in Linienführung, Gefälle, Querschnittsform und -beschaffenheit zweckmäßige Leitungen, gute Instandhaltung, Reinigung, Spülung und Lüftung der Leitungsnetze. Die Frischhaltung des Abwassers während der ganzen Reinigungsbehandlung ist sowohl ein Gebot der technischen Zweckmäßigkeit wie auch aus hygienisch-ästhetischen Gründen zur Vermeidung von Geruchsbelästigungen zu fordern. In der Frühzeit der Abwasserreinigungstechnik mangelte es noch an dieser grundsätzlichen Erkenntnis. In zahlreichen englischen biologischen Kläranlagen, die um die Jahrhundertwende gebaut wurden, ließ man das Abwasser absichtlich anfaulen, um es dann erst biologisch zu reinigen, d. h. der aeroben bakteriellen Wirkung zu unterwerfen. Dies geschah auf Grund der These: „Zuerst anaerobe Bakterien zur Zerkleinerung und darauf aerobe zur Oxydierung“. Hierbei wurde verkannt oder noch nicht erkannt, daß es nicht nur technisch einfacher und wirtschaftlicher ist, das Ungelöste so schnell und so weitgehend wie möglich zur Abscheidung zu bringen und die weitere Behandlung der Flüssigkeit von diesem Teil des Unrats zu entlasten, sondern auch, daß die biologischen Einrichtungen als solche viel leichter und zuverlässiger arbeiten, wenn sie statt mit fauligem, mit frischem, bereits sauerstoffhaltigen Wasser gespeist werden. Die neuzeitige Abwasserreinigungstechnik ist von diesen veralteten Verfahren gänzlich abgekommen, die man nur noch in gewissen Ausnahmefällen (Grundstückskläranlagen) dann anwendet, wenn wegen mangelnder Bedienung die abgesonderte Behandlung des Schlammes unangebracht erscheint. Die neuartige Abwasserbehandlung arbeitet vielmehr nach dem Leitspruch: rechtzeitige Trennung von Abwasserflüssigkeit und Abwasserschlamme, erstere zur aeroben Oxydierung, letztere zur anaeroben Zersetzung (Ausfäulung).

In neuerer Zeit fand man es gleichwohl aus örtlichen Gründen mitunter angebracht, den Schlamm nicht auszufaulen, sondern durch Filtern (Zellenfilter) rasch zu entwässern, um die so gewonnenen Schlammkuchen als Düngemittel zu verwerten oder zu verbrennen. Auch ausgefauten Schlamm unterwirft man manchmal diesem beschleunigten Entwässerungsverfahren. Der zu filternde Schlamm muß nun in jedem Falle zur Filterung vorbereitet werden (sludge conditioning), damit diese auf keine Schwierigkeiten durch rasche Versetzung der Filtertücher stößt. Diese Filterbarmachung des Schlammes erstreckt sich stets auf die im Schlammwasser enthaltenen gelösten und halbgelösten (kolloiden) Stoffe, sie betrifft nicht die ungelöste Substanz der Masse. Es handelt sich also um Ausflockung der Kolloide des Schlammwassers und Sicherung dagegen, daß solche im Zuge der Filterung nicht erneut zerschleimen und daß aus den echt gelösten Stoffen keine Kolloide rückgebildet werden. Dies wird erreicht durch Zusatz eines Fällungsmittels, als welches sich besonders Eisenchlorid (FeCl_3) bewährt hat, und durch gleichzeitige Einstellung einer leicht sauren Reaktion des Schlammes (pH-Wert unter 7), da bei letzterer das den kolloiden Zustand bedingende „Lösungsglied“ nicht bestehen kann. Die ausgeflockten Kolloide verbleiben bei der Filterung im Schlammkuchen (aus dessen Asche später ein Teil des verwendeten Fällungsmittels zurückgewonnen werden kann), der saure Filterablauf wird — falls, wie es meistens geschieht, er in den Zulauf der Kläranlage geleitet wird — von der Alkalität der weitaus größeren Menge des Abwassers abgestumpft.

Bei Filterung von ausgefautem Schlamm kann man dessen Ammoniakgehalt durch wiederholtes Auswaschen mit Wasser (elutriation) herabsetzen. Man spart dadurch an dem fallenden Eisensalz, das durch Ammoniak unwirksam gemacht wird. Findet die Erwärmung des Faulraumes durch Einleiten von warmem Wasser in die Schlammmasse statt, so wird dadurch gleichzeitig auch die Auswaschung des Schlammes besorgt.

VIII. Schluß

Im Vorstehenden konnten die bei der Abwasserbehandlung stattfindenden Vorgänge nur in den Hauptumrissen skizziert werden und dies auch nur, soweit es sich um städtisches Abwasser ohne wesentliche Zulaufe gewerblicher Abfallflüssigkeiten handelt. Der letzteren gibt es so viele Arten und ihr Einfluß auf das Verhalten des Hausabwassers der Städte kann so mannigfaltig sein, daß die dabei in Frage kommenden chemischen und biochemischen Vorgänge für jede Gruppe derartiger Flüssigkeiten besonders abgehandelt werden müßten. Der Ingenieur, der einen tieferen und vollständigeren Einblick in die z. T. recht verwickelten stofflichen und biologischen Beziehungen und Wandlungen gewinnen möchte, die in der Werkstatt der Natur auf dem Wege vom Schmutzwasser zum reinen Wasser vor sich gehen, wird nicht umhin können, zu Sonderwerken aus dem Gebiete der Chemie, Bakteriologie, Tier- und Pflanzenkunde zu greifen, an denen es im deutschen Schrifttum eine reichliche Auswahl gibt. Die einschlägigen Kennt-

nisse können freilich aus Büchern allein nicht geschöpft werden, dazu ist vielmehr jahrelange praktische Arbeit in Fachlaboratorien, vor allem in chemischen und biologischen, unerlässlich. Darum wird der Ingenieur bei der Lösung schwieriger und besonders neu auftauchender Probleme der Abwasserbehandlung ohne Zurateziehen von Fachleuten der genannten naturwissenschaftlichen Gebiete nicht auskommen. Mögen ihn daher diese Zeilen von der Notwendigkeit überzeugen, den von ihm zu lösenden Aufgaben nicht nur als Formender und Gestaltender, sondern auch als um die neuesten Erkenntnisse der Naturwissenschaften und ihrer zeugenden befruchtenden Kräfte sowie um ihre Denk- und Arbeitsweisen Wissender gegenüberzustehen.

Über die Druckverteilung im Boden hinter Wänden verschiedener Art

Mit Ergebnissen eigener Versuche von Dr.-Ing. Heinrich Press, Berlin

Vorbemerkung.

Von dem Verfasser des in unserem Verlage erschienenen Buches „Der Boden als Baugrund“ werden in dieser Abhandlung Versuche und Messungen des Verfassers und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen über die Verteilung des Druckes im Boden hinter Wänden verschiedener Art wiedergegeben.

Auf Grund seiner reichen Erfahrung als Bauleiter und später als Oberbauleiter mancher Untergrundbahnbaustelle sowie vieler Unterfahrungsbauwerke, zahlreicher Tiefgründungen, Stützmauern, Bohl- und Spundwände war es dem Verfasser möglich, in verschiedenen Böden Messungen über die Druckverteilung im Boden hinter Wänden, Messungen über Siefendrucke usw. vorzunehmen und so die Ergebnisse der Großmodellversuche durch Messungen an Bauwerken zu überprüfen.

Wir hoffen, durch diese Veröffentlichung zur Klärung der vielfach noch umstrittenen Erddruckfragen beizutragen.

Die Schriftleitung.

Zusammenfassung.

Nach einem kurzen einleitenden Ueberblick über die Erddrucktheorien werden im 1. Abschnitt die Böden hinter Wänden in Abhängigkeit von den Eigenschaften der einzelnen Böden, im 2. Abschnitt in Abhängigkeit von vorhandenen oder möglichen örtlichen Verhältnissen und im letzten, 3. Abschnitt schließlich in Abhängigkeit von Bauwerksart und Ausführung unter Mitteilung zahlreicher Versuche behandelt.

Einleitung.

Ueber Erddrucktheorien.

Die älteren, noch heute z. T. angewandten Erddrucktheorien gehen von einer dreieckförmigen Druckverteilung mit größtem Druck am Fuße des Bauwerkes entsprechend der Annahme, daß der Gesamtdruck mit dem Quadrat der Wandhöhe zunimmt, aus. Sie berücksichtigen in keiner Weise die durch die verschiedenartigen Wandbewegungen und -Verformungen sich auswirkenden Gegenkräfte.

Der Erddruck soll nach der Annahme der einen Forscher unter dem Reibungswinkel ρ zwischen Wand und Boden, nach der anderer in zur Oberfläche des Bodens gleichlaufender Richtung in $\frac{1}{3}$ der Wandhöhe angreifen.

Schließlich machen die älteren Erddrucktheorien nur geringen Gebrauch von den ermittelten Kennziffern der Böden, und sie nehmen bei der Durchführung der Berechnung auf die besonderen Umstände im Boden, des Bauwerkes, seines Werdeganges usw. kaum Rücksicht.

In den letzten Jahrzehnten ist aber durch zahlreiche Forscher mit dem Aufschwung der Bodenmechanik auch dieses mehr beachtet worden. Nach Coulomb [6, 25, 27], der bei der Aufstellung seiner Erddrucktheorie von der Annahme einer gleichmäßigen, unzusammendrückbaren Masse ausging, bei der die Scherfestigkeit dem Flächendruck proportional ist, sprechen die bekannten und bisher gebräuchlichen Erddrucktheorien [1, 2, 3, 6, 9, 10, 14, 18, 19, 20, 23] zumeist von ebenen Gleitflächen, in denen die Reibungskräfte sich auswirken und wobei der Bodenwiderstand in der gedachten ebenen Gleitfläche dem Coulomb'schen Reibungsgesetz gehorcht. Hierbei sind $\tau = K + \sigma \cdot \operatorname{tg} \rho$ als die bei einer Gleitfläche als stets gleich groß bleibend angenommene Schubspannung K und $\operatorname{tg} \rho$ als Konstanten, σ als der senkrecht zur Wand wirkende Bodendruck zu betrachten. K und $\operatorname{tg} \rho$ sind jedoch tatsächlich keine Konstanten und somit keine Bodenkennziffern.

U. a. schuf Rebhann [10] (1871) auf Grund der Coulomb'schen Theorie ein graphisches Erddruckberechnungsverfahren unter der Annahme, daß der Erddruck mit der Flächensenkrechten der Wand den zwischen Wand und Boden wirkenden Reibungswinkel bildet. —

Winkler ging bei der Ermittlung von Spannungsellipsen gleichfalls von der Annahme ebener Gleitflächen aus.

Rankine hingegen baute seine Theorie auf die Annahme vom Gleichgewicht jeden Bodenteils einer eben begrenzten, unendlichen Bodenmasse auf bei lotrechter Stützwand und waagerechter Oberfläche.

Culmann und Mohr [19] u. a. lieferten hierzu graphische Verfahren.

Die Annahme, daß der Erddruck der Resultierenden der Spannungen einer nach 2 Richtungen unendlichen Bodenmasse gleich ist, widerspricht jedoch den Messungen, nach denen der zu berechnende Erddruck bei Auftritt der Gleitung wesentlich kleiner ist als der „Ruhedruck“.

Forchheimer [10] fand durch Versuche, daß gekrümmte Gleitflächen auftreten. Auch stellte er die Abhängigkeit der Gleitflächenlage von der Stützwandbewegung fest.

Müller-Breslau [18] gab u. a. neben Durchführung umfangreicher Versuche mit aufschlußreichen Ergebnissen ein Näherungsverfahren zur Ermittlung des Erddrucks bei gekrümmten Gleitflächen. Krey [14] stellte auf Grund der Rebhann'schen Ermittlung Erddrucktabellen für verschiedene Sonderfälle auf.

Auch Mund u. a. entwickelten verschiedene Berechnungsverfahren.

Rendulic [24] untersuchte die Abhängigkeit der Gleitflächenbildung von der Art der Bewegung der Stützmauer unter Zugrundelegung des Satzes vom Größtwert der verlorenen Arbeit.

Ohde [22] gibt auf Grund der durch die Wandbewegung bedingten Gleitflächenform unter gewissen Voraussetzungen eingehende Berechnungsverfahren des Erddrucks an, wobei die Annahme vom Größtwert des Erddrucks bei gekrümmten Gleitflächen beibehalten wird.

Spilker, Klenner, Lehmann u. a. [26, 15, 17, 4, 5, 7, 8, 11, 13, 21, 22] haben Messungen an Baugrubenwänden zur Ermittlung der Steifendrucke und des Erddruckes durchgeführt.

Terzaghi [27, 28] stellte auf Grund von Messungen und Beobachtungen die Grenzen der Coulomb'schen Erddrucktheorie fest und gab zur Berechnung des Erddruckes gegen ausgesteifte Bohlwände ein angenähertes Berechnungsverfahren an. —

Erst eine genaue Bodenuntersuchung und die Beachtung aller wesentlichen in Betracht kommenden Kennziffern sowie die Bewertung der Veränderbarkeit des Bodens infolge der verschiedenen Einflüsse und die Kenntnis der Bewegungsmöglichkeiten des Bauwerkes oder seiner Teile geben allein die Gewähr für eine einwandfreie, wenn auch näherungsweise durchzuführende Erddruckberechnung, durch die Ueberbemessungen, aber auch viele ernste Unfälle vermieden werden.

I. Abschnitt.

Der Boden hinter Wänden in Abhängigkeit von Eigenschaften der einzelnen Böden.

Da für eine genaue Ermittlung und bei der Schilderung von durchgeführten und untersuchten Bauvorhaben die Bekanntgabe der Bodenkennziffern, so weit sie von Einfluß bei den hier behandelten Fällen sind, von größter Wichtigkeit ist, erst durch sie ein Vergleich, ein Rückschluß auf ähnliche Vorkommnisse möglich ist, sollen vorweg in diesem Abschnitt kurz die wesentlichen für den Seitendruck wichtigen Kennziffern der Böden und ihre Ermittlung¹⁾ sowie die durchzuführenden Versuche aufgeführt werden.

Hierbei sei jedoch besonders darauf hingewiesen, daß, wenn zwei verschiedene Böden eine gemeinsame und gleich große Kennziffer besitzen oder sogar mehrere — aber nicht alle wesentlichen Kennziffern gemeinsam haben, die Eigenschaften der Böden und ihr Verhalten durchaus verschieden sein können.

A. Am gestörten Boden sind zu ermitteln:

a) Stoffgewicht.

$$\text{Das Stoffgewicht ist } \gamma_E = \frac{g}{g_p + g - g_E},$$

wobei g das Trockengewicht des Bodens,
 g_p das Gewicht des Pyknometers mit bestimmter
 Menge destillierten Wassers,
 g_E das Gewicht des Pyknometers mit der gleichen
 Menge Boden und Wasser ist.

Das Stoffgewicht dient zur indirekten Bestimmung des Porenvolumens, als Hilfswert zur Bestimmung des Raumgewichtes, bei Spannungsermittlungen im Boden, bei Durchlässigkeits- und Druckversuchen.

b) Kornform.

Die Form und Oberflächenbeschaffenheit der Körner beeinflussen die Strukturbildung, die Dichte, die Zusammendrückbarkeit und Elastizität, Plastizität, Haftfestigkeit, innere Reibung, Kapillarität und Durchlässigkeit. Von wesentlichem Einfluß auf die Lastübertragung ist die Zahl der Berührungspunkte bzw. -flächen der Körner in der Raumeinheit.

c) Kornverteilung.

Die Kornverteilung wird durch die Sieb- und Schlämmanalyse festgestellt und als Hilfswert bei Ermittlung der horizontalen Durchlässigkeit benötigt. Auch zur Ermittlung des den Hohlraumgehalt eines Bodens beeinflussenden Korngrößenanteils und des das physikalische Verhalten stark beeinflussenden Gehaltes an Feinkorn wird die Auswertung der Sieb- und Schlämmanalyse gebraucht.

¹⁾ Näheres siehe Press, Der Boden als Baugrund, 2. Aufl., Berlin 1940, Wilh. Ernst & Sohn.

d) Zusammensetzung.

Das physikalische Verhalten des Bodens ist von ihrem Aufbau, der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung abhängig. Plastizität, Festigkeit, Elastizität, Durchlässigkeit u. a. von Tonböden werden in ihrer Größe mitbestimmt durch die physikalische und chemische Bindung von Wasser und durch die elektrochemische Wirkung der Oberflächenkräfte, die durch die mineralogischen und chemischen Bestandteile verursacht werden. Auch die Haftspannung wird u. a. von den elektrochemischen Eigenschaften des Bodens mitbestimmt.

e) Beimengungen.

Die Art und die Mengenanteile der Beimengungen sind zu bestimmen. Bei bindigen Böden bewirkt schon ein ganz geringer Gehalt an organischen Stoffen eine Erhöhung der Plastizität und eine Verminderung der inneren Reibung.

f) Kapillarität.

Die Bestimmung der Kapillarität erfolgt mit Hilfe des Kapillarimeters durch Belasten der mit einem der Fließgrenze entsprechenden Wassergehalt angemachten Bodenprobe durch Druckluft und Beobachten der Konsolidierung am ausgepreßten Wasser.

Die Kapillarkraft bestimmt die Wassersteighöhe im Boden. Kapillarspannungen vermindern den Wert des Erddruckes.

g) Plastizität.

Mit der Konsistenzform ändern sich die physikalischen Eigenschaften eines Bodens. Daher sind die Schrumpfgrenzen, die Ausroll-, Klebe- und Fließgrenze sowie die Differenz zwischen Fließ- und Ausrollgrenze als Plastizitätszahl benannt zu bestimmen.

Die Erhöhung der Plastizität durch größere Menge an Tonkolloide oder durch Gehalt an organischen Stoffen in feinsten Verteilung verursacht eine Verminderung der inneren Reibung.

h) Verdichtungsfähigkeit.

Zur Ermittlung der Verdichtungsfähigkeit sind bei verschiedenen Laststufen und Erschütterungen mit gestörten Bodenproben Versuche durchzuführen und die dabei jeweils vorhandenen Porenvolumen festzustellen.

B. Am ungestörten Boden sind zu ermitteln:**a) Struktur und Porenziffer.**

Es ist festzustellen, ob Einzelkornstruktur, Waben-, Flocken- oder Krümelstruktur vorhanden ist.

Der Hohlraumgehalt ist $n = \frac{V - g/\gamma_E}{V}$

$$e = \frac{n}{1 - n} = \frac{V \gamma_E}{g} - 1,$$

wobei V der Rauminhalt der ungestörten Bodenprobe,

g das Trockengewicht,

γ_E das Stoffgewicht ist.

Die Hohlraumgehalte von Ablagerungen bindiger Böden erfahren mit dem Druck, unter dem sie stehen, u. a. von der Festigkeit der schuppenförmigen Bodenbestandteile abhängige Veränderungen. Durch Erschütterungen verwandeln sich lockere kiesige Lagerungen in dichtere, verlieren einige bindige Böden unter besonderen Bedingungen infolge Strukturstörung an Festigkeit und Steifigkeit.

b) Raumgewicht.

Das Raumgewicht γ_R (Das Gewicht je Raumeinheit des ungestörten Bodens, einschl. des in seinen Hohlräumen enthaltenen Wassers) dient zur weiteren Kennzeichnung des Bodens und als Hiltswert bei erdstatischen Berechnungen.

c) Natürlicher Wassergehalt.

In Prozenten des Trockengewichts ist der Wassergehalt

$$w = \frac{g_n - g_t}{g_t} \cdot 100,$$

wobei g_n das Gewicht der ungestörten Bodenprobe,
 g_t das Trockengewicht ist.

Der Wert des natürlichen Wassergehaltes wird benötigt zur Beurteilung der Verdichtung, des Böschungswinkels u. a.

d) Konsistenz.

Die Konsistenz (der Zustand eines Bodens in natürlicher Lagerung) wird durch die Lage des natürlichen Wassergehaltes zur Ausroll- und Fließgrenze gegeben.

Die Konsistenzzahl ist:

$$K = \frac{\text{Fließgrenze} - \text{Wassergehalt}}{\text{Fließgrenze} - \text{Ausrollgrenze}}$$

Es sind Untersuchungen im gestörten und ungestörten Boden durchzuführen, die erst erkennen lassen, welche Folgen durch Strukturzerstörungen entstehen.

e) Durchlässigkeit.

Mit dem Druck, unter dem der Boden steht, der Porenziffer, und der Wassertemperatur ändert sich bei einem Boden die Durchlässigkeit. Die Durchlässigkeit nimmt mit geringerer Korngröße ab, die Kapillarität zu.

Die Durchlässigkeitsziffer ist $D = 1,36 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{n \cdot L^4}{t^2}$, wobei t die Zeit in Sekunden, n der Hohlraumgehalt des Bodens, L die Durchfeuchtungsstrecke ist.

Der Grad der Durchlässigkeit ist sehr verschieden und daher ein besonderes Merkmal des Bodens. Er ist wichtig u. a. zur Beurteilung des Verhaltens der Hinterfüllung von Stützmauern.

f) Scherfestigkeit s. S. 40

Die Scherfestigkeit τ setzt sich zusammen aus dem mit dem Wassergehalt und somit auch mit dem Druck veränderlichen (also von der Porenziffer abhängigen) Wert der Haftspannung (Kohäsion) $K = x \cdot c$ und dem Wert der inneren Reibung $\text{tg } \rho$, der proportional mit dem Normaldruck σ abzüglich bzw. zuzüglich des vom Porenwasser übertragenen Teiles der Normalspannung p_w steigt.

$$\tau = x \cdot c + (\sigma \pm p_w) \text{tg } \rho.$$

Die Ziffer der inneren Reibung ist dabei nicht mit der Tangente des natürlichen Böschungswinkels gleichzusetzen, wie aus der Beobachtung, daß jeder Sandboden nach Entfernen der abstützenden Wand eine von den Bodeneigenschaften abhängige natürliche Böschung bildet, hergeleitet wurde. Der natürliche Böschungswinkel ist vielmehr außer von der Reibung noch von anderen Faktoren, wie z. B. Oberflächenspannung u. a. bedingt.

Solange der Boden geringer belastet wird als er ursprünglich belastet war, besteht im Porenwasser der ungestörten Bodenprobe bei den Versuchen Unterdruck, so daß der Boden Wasser ansaugt und schwillt.

Die Schubfestigkeit τ wird dadurch größer als die dem natürlichen Wassergehalt entsprechende. Bei höherer Belastung dagegen tritt im Porenwasser Ueberdruck auf, wodurch die Schubfestigkeit geringer wird als die dem natürlichen Wasserdruk entsprechende Schubfestigkeit.

Zur Ausführung des Scherversuches wird ungestörter Boden in einem Kasten mit zwei übereinander stehenden Rahmen eingebaut. Von den Rahmen mit gezahnter Bodenberührungsfläche ist der obere horizontal verschiebbar.

Abb. 1a gibt das von A. Casagrande verbesserte Kreysche [14] Schergerät wieder. Daraus ist er-

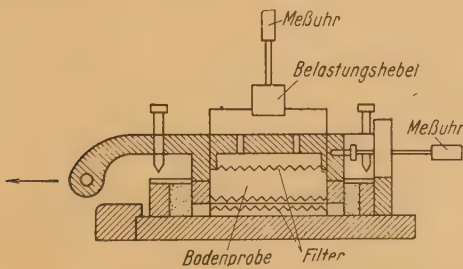


Abb. 1a

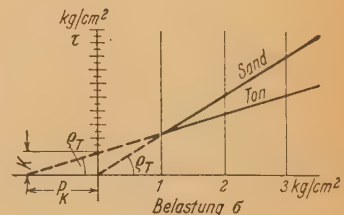


Abb. 1b

sichtlich, daß der im Kasten einzubringende Boden von oben belastbar ist. An lotrechten Meßuhren ist bei den Versuchen der Verlauf der Konsolidierung dauernd bis zum Ruhestand zu verfolgen. Nachdem sich der Wassergehalt des Bodens völlig dem Druck angepaßt hat, der Grenzwert der inneren Reibung also auftritt, ist der Scherversuch durchzuführen.

Die durch stufenweise aufgetragenen waagerechten Scherkräfte bei Zeitbeobachtung auftretenden waagerechten Verschiebungen werden beobachtet und die Scherbeanspruchung festgestellt. Der Wassergehalt der Probe ist vor und sogleich nach dem Versuch zu ermitteln.

Zur Ausschaltung der „scheinbaren“ durch die Kapillarkraft entstehende Kohäsion wird die Probe beim Versuch unter Wasser gesetzt. Zum ungehinderten Ein- und Austritt des Porenwassers sind Boden und Deckel der Rahmen mit Öffnungen zu versehen.

¹⁾ Nach v. Terzaghi u. A. Casagrande [28].

Die Versuche haben ergeben, daß feinkörnige Böden (Schluff, lockergelagerter feiner Sand, Ton) bei Scherkräften und gleichbleibender senkrechter Belastung an Volumen verlieren (dichtgelagerter Sand dehnt sich dabei aus), daß die Scherfestigkeit dieser Böden nicht nur von der Dichte und der Normalspannung, der Größe der Scherkräfte und der Zeit ihrer Steigerung, sondern auch von den die Geschwindigkeit des Verdichtungsprozesses beeinflussenden Werten abhängig ist. Diese Böden besitzen keine konstanten Winkel der inneren Reibung.

Böden, bei denen der Austritt des Porenwassers jedoch nicht oder wenig behindert ist (Kies u. a.), weisen dagegen einen im Bereich der vorkommenden Drücke mit hinreichender Genauigkeit als feststehend zu bezeichnenden Winkel der inneren Reibung auf.

Die Ziffer der inneren Reibung ist u. a. mit abhängig von der Dichte und Struktur des Bodens und der Art der Lagerung, aber auch von den Umständen, unter denen die Bewegung stattfindet sowie von der Art derselben.

Die Gleitkörperbildung erfolgt ziemlich plötzlich.

Sie entsteht durch Umlagerung der in der Zerrungszone liegenden Körner.

Bei Sand hängt der Reibungswert u. a. außer vom Druck von der Dichte, Kornform, Korngröße, Oberflächenbeschaffenheit, den Beimengungen (Schmiermittel) und dem Wassergehalt ab. Die Ziffer der inneren Reibung sinkt mit abnehmender Korngröße, mit dem wachsenden Gehalt an Tonkolloiden und organischen Beimengungen.

Der Anteil an schuppenförmigen Bestandteilen, die sich leicht verbiegen und verschieben, wie das die Körner umgebende oder das aufgenommene Wasser verändern bei bindigen Böden den Reibungswert. Die auf Verkittung der Körner beruhende Haftfestigkeit, die bei großem Anteil an Tonkolloiden größer ist, vermindert sich mit Strukturzerstörung. Die im übrigen von den elektrochemischen Eigenschaften abhängige Haftfestigkeit ist bei gleichem Boden und gleichen Druckverhältnissen höher, wenn der Boden bereits früher vorbelastet war.

Neben der Untersuchung des Bodens in seinem augenblicklichen, natürlichen Feuchtigkeitszustand ist es aber erforderlich, auch die Untersuchungen auszudehnen auf den möglichen, das Bauwerk gefährdenden Wassergehalt. Darüber hinaus sind, soweit mit Erschütterungen beim späteren Bauwerk zu rechnen ist, Versuche unter Anordnung von Erschütterungen durchzuführen.

g) Gleitwiderstand zwischen Erde und Wand.

Für die verschiedenen Rauigkeitsgrade der Wände ist bei jedem Boden bei den verschiedenen möglichen Wassergehalten durch Versuche die Wandreibung zu bestimmen.

Der Tangens dieses Reibungswinkels δ Erde auf Wand ist jedoch nicht dem Verhältnis von Zugkraft zur Last gleichzusetzen. Wie durch zahlreiche Versuche erkannt wurde, nimmt das Verhältnis mit wachsendem Druck ab. Abb. 2 zeigt das von Müller-Breslau zur Bestimmung der Wandreibung entworfene Gerät.

h) Natürlicher Böschungswinkel.

Nur bei Sand, soweit er kaum Haftfestigkeit besitzt, ist annähernd die Ermittlung des Reibungswinkels durch den natürlichen Böschungswinkel möglich. — Die bei verschiedener Dichte und Wassergehalt sowie unter Wasser möglichen Böschungswinkel sind durch Versuche zu ermitteln.

i) Zusammendrückung bei ungehinderter Seitenausdehnung.

Die an ungestörten bindigen Bodenproben durchzuführenden Belastungsversuche sind zur Beurteilung der Tone bedeutsam, wenn mit gleichem Boden vom selben Wassergehalt, der aber durchgeknetet, also gestört wurde, ein weiterer Druckversuch durchgeführt wird. Tone, die nach Durchkneten wesentlich an Haftfestigkeit und dadurch an Druckfestigkeit verlieren, weisen auf Rutschgefahr hin; sie zeigen mithin auch hinter Wänden ein anderes Verhalten.

Die Versuche ergeben nur Näherungswerte, die jedoch wegen der einfachen und schnellen Versuchsdurchführung zur Ueberprüfung der Druckfestigkeit, des Elastizitätsmoduls, zur Ermittlung der Haftfestigkeit und des Reibungswinkels sehr wertvoll sind¹⁾

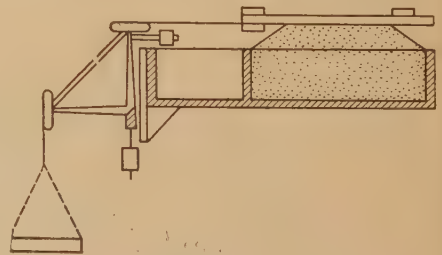


Abb. 2

¹⁾ Zur überschlägigen Ermittlung des Reibungsbeiwertes sowie der Konsistenz ist vom geodätischen Ausschuß der schwedischen Staatsbahnen für bindige Böden der Fallkegelprüfer durchgebildet worden. Kegel von verschiedenen Gewichten und 30° und 60° Spitzenwinkel werden auf ungestörtem und gestörtem Boden von bestimmter Höhe fallen gelassen und die von der Bodendruckfestigkeit und der Reibung zwischen Kegel und Boden, die mit dem Wassergehalt sich verändert, abhängigen Eindringungsstufen der Kegel festgestellt. Einen eindeutigen Kennzifferwert vermitteln diese Untersuchungen nicht.

Bei den Versuchen sollen die Proben allseitig unter Wasser gesetzt werden, wobei für Ausgleich des Porenwasserdruckes Sorge zu tragen ist.

k) Zusammendrückung bei behinderter Seitenausdehnung.

Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls E , der Zusammendrückbarkeit bei verhinderter Seitenausdehnung wird ungestörter Boden in einem geschlossenen Metallzylinder stufenweise be- und entlastet, wobei die Zusammendrückung bzw. Schwellung und die Zeit beobachtet werden. Die Versuche werden, damit keine kapillaren Spannungen auftreten, unter Wasser ausgeführt. Die Menge des bei der Zusammendrückung ausgequetschten Porenwassers ist dabei zu messen. Das Ergebnis der Messungen ist als Zeit-Zusammendrückungskurve und Zeit-Schwell-Kurve auf Setzung oder auf Porenziffer bezogen aufzutragen. Die Neigung der Kurven ergibt

$$E = \frac{\Delta p}{\Delta \varepsilon} (1 + \varepsilon_m).$$

Abb. 3 zeigt ein Porenziffer-Druck-Diagramm.

Der E -Wert steigt mit der Druckerhöhung.

Aus dem Druck-Setzungsdiagramm (Abb. 4) ist eindeutig der Einfluß einer früheren Belastung des Bodens erkennbar. Der E -Wert im Bereich des wieder

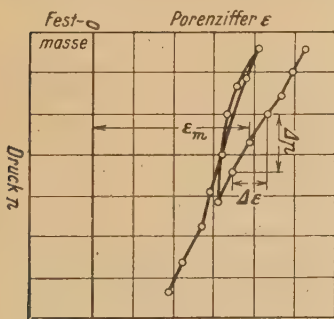


Abb. 3

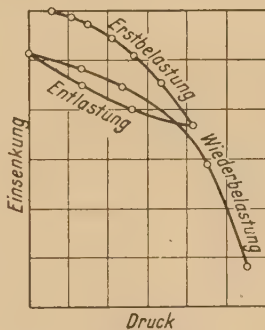


Abb. 4

belasteten Teiles ist größer. Die Setzungsdauer ist nicht nur vom Strömungswinkel, der dem Ausweichen des Porenwassers entgegentritt, sondern auch von der Schichtdicke abhängig.

Durch Belastung und Erschütterung wird locker gelagerter Sand mehr verdichtet als dicht gelagerter. Sand verändert aber unter höherer ruhender Belastung gegenüber bindigem Boden sein Gefüge nur gering.

Auf die Größe der Setzungen wirken sich der Aufbau, die Nachgiebigkeit des Gefüges, die Festigkeit, Form, Größenanteile, Elastizität und Wasserbindefähigkeit der Bestandteile, die chemisch-minera-

logische Zusammensetzung, das Vorhandensein von Elektroden oder Schutzkolloiden aus.

l) Senkrechte und waagerechte oder geneigte Probebelastung des Baugrundes.

Zum Abprüfen und zum Vergleich der verschiedenen Böden dienen mit verschiedenen großen Flächen durchzuführende Probebelastungen auf der Baugrubensohle und in Schichten darunter, über die im „Der Boden als Baugrund“¹⁾ ausführlich berichtet ist.

Der Einfluß des Ausweichens des Bodens, der Lastflächengrößen und -Form und die Setzungszeiten sind besonders dabei zu beachten.

Die Tragfähigkeit in senkrechter Richtung ist nicht mit der in waagerechter oder geneigter Richtung vergleichbar.

Da waagerechte Probebelastungen ohne großen Aufwand durchzuführen sind, sollten sie stets mit ausgeführt werden.

II. Abschnitt.

Der Boden hinter Wänden in Abhängigkeit von vorhandenen oder möglichen örtlichen Verhältnissen.

Neben den im Abschnitt I aufgeführten einzelnen Eigenschaften der Böden sind für die Beurteilung und Wirkung von Seitendruck die vorhandenen oder möglichen örtlichen Verhältnisse natürlicher oder künstlicher Art von Belang und daher besonders zu beachten und festzustellen.

a) Be- und Entlastung.

1. Durch Boden oder gleichmäßig verteilte sonstige Last.

Durch Vereinfachung der Rechnung wird die Be- oder Entlastung in Bodenhöhe umgewertet und der Erddruck für die so ermittelte Gesamthöhe berechnet. — Wenn auch für

¹⁾ 3. Aufl. Berlin 1948, Wilh. Ernst & Sohn.

alle Wandbewegungen, mit Ausnahme der um den Fußpunkt, sich unter dem Einfluß der Auflast die Lage des Gleitkörpers wesentlich ändert, kann die lineare Umwertung bei der allgemein geringen Abweichung beibehalten werden. — Der E-Wert ist für wiederholt be- und entlasteten Boden ein anderer als für den erstmalig belasteten Boden. Auch der Seitendruck ist entsprechend dem anders gestalteten Druck-Porenzifferdiagramm bei mehrfach belastetem Boden ein anderer. Jede Verdichtung, insbesondere künstliche Verdichtung hinter Stützwänden, verursacht eine Erhöhung des Erddruckes. Der Rückgang der Größe des Erddruckes bei Entlastung entspricht aber nicht dem Wert der Zunahme bei Belastung, sondern ist kleiner.

Da der Erddruck sich mit dem Spannungszustand im Porenwasser verändert, tritt bei wasserhaltigen Böden mit der Druckerhöhung zunächst Ueberdruck im Porenwasser auf, bis sich Wassergehalt und Porenziffer den neuen Druckverhältnissen angepaßt haben. Bei Entlastung entsteht dagegen zunächst im Porenwasser, sofern zuvor Gleichgewicht herrschte, Unterdruck, bis mit der Zeit der Ausgleich erfolgt. Mit dem Porenwasserüberdruck erhöht sich der Erddruck, mit dem Unterdruck wird er geringer. Die Porenwasserdruckverhältnisse sind daher besonders zu beachten. — In größerer Tiefe kann unter gewissen Umständen eine Verminderung des Erddruckes durch die infolge der Belastung und Bewegung sich bildende innere Verspannung, „Gewölbewirkung“, eintreten. Auch wenn Boden unter dem Bau oder Bohlwerk hervorquellen kann oder bei Trägerbohlwänden z. B. die unteren Bohlen sich mehr durchbiegen und somit Hohlräume entstehen, kann im Boden Verspannung auftreten. Schließlich kann, insbesondere wenn Boden zwischen zwei in geringem Abstand voneinander angeordneten Wänden (z. B. Fangedamm zwischen Spundwänden) ansteht, durch „Aufhängen des Bodens an den Wänden“ der Erddruck eine Minderung erfahren.

2. Durch Einzellast oder kurze Streckenlast.

Ueber den Einfluß einer Einzellast auf den Erddruck und seine Verteilung sind u. a. vom Verfasser eingehende Messungen vorgenommen, von denen einige im Abschnitt III wiedergegeben sind.

Mit wachsender Größe der Last nimmt der Erddruck zu, mit dem Wandern der gleichbleibenden Last vom Bauwerk fort, nimmt der Erddruck im oberen Teil der Wand zunächst zu, im unteren zunächst ab. Die Resultierende des Erddruckes verschiebt sich somit im vom Boden abhängigen Einflußbereich der Last zunächst nach oben zu. Bei feststehender Last wurde dagegen mit der Laststeigerung nur sehr geringe Verschiebung der Lage der Resultierenden festgestellt. Mit der weiteren Enttfernung der Auflast von der Wand (etwa Wandabstand der Last = Höhe der Wand) verschwindet dieser Einfluß. Mit der Entfernung von der Stützwand nimmt bei gleichbleibender Last der Gesamtwert des Erddruckes infolge der Last ab. Der Rückgang des Erddruckes bei Entlastung ist zumeist nur gering.

Im übrigen sei vermerkt, daß mit jeder Wandbewegung eine Veränderung der Druckverteilung erfolgt.

3. Durch geneigte Bodenoberfläche.

Entsprechend dem Abstand der Mittelkraft des Einflußbereiches der geböschten Auflast verschiebt sich die Resultierende gegenüber derjenigen beim Erddruck ohne Auflast und waagerechten Oberfläche nach oben. Abb. 33c gibt Messungen bei verschiedenen Böschungsneigungen wieder. Der Einfluß der größeren Auflast durch die steilere Böschung ist klar erkennbar.

b) Wasser.

Bei Boden unter Wasser wirkt der Wasserdruck und der Erddruck des um den Auftrieb leichteren Bodens.

Jede Wasserstandsänderung im Boden bewirkt eine Veränderung der Bodenbelastung des Erddruckes. Mit der Verringerung des Wasserdrucks bei Absinken des Wasserstandes wird das Korngefüge infolge Fortfall des Auftriebes und durch das im Boden verbleibende Wasser schwerer, der Grundwasserträger jedoch erfährt mit Fortfall des Wasserdruckes eine Entlastung. Der Einfluß jeder Wasserstandsänderung auf jede einzelne Schicht ist daher sehr zu beachten. Mit der Absenkung des Wasserstandes kann unter gewissen Voraussetzungen durch die Strömung des Wassers nach unten eine Umlagerung der Körner erfolgen. U. U. bewirkt eine Wasserhaltung z. B. eine Umbildung der Lagerung von einer labileren in eine stabilere. Der Reibungswiderstand ist im abgesenkten Boden größer. Mit dem Wiederansteigen des Grundwassers nach Absinken tritt mit dem Auftrieb eine Entlastung, infolge Fortfall des Gewichtes des im Boden verbliebenen Wassers eine Minderung des Gewichtes, gegebenenfalls infolge der Strömung des Wassers nach oben eine Kornumlagerung und durch die eingeschlossene Luft ein nach oben wirkender Druck auf. Von der Zahl der Absenkungen, der Korngrößenverteilung, dem Druck und Saugunterschied, der Anfangsporenziffer sind die Setzungs- und Hebungswerte abhängig. Mit der Wasserstandshebung erfahren feinstkörnige Sande eine Auf-

lockerung, mit der Wasserabsenkung eine Verdichtung. Dementsprechend wächst der Erddruck bei Wasserabsenkung. Besonders zu beachten ist der auftretende Strömungsdruck. Der hydrostatische Porenwasserdruck in der Tiefe h unter freiem Grundwasserspiegel ist

$$p_w = h \cdot \gamma_w$$

Der kritische Strömungsdruck ist:

$$p_{krit} = (\gamma - \gamma_w) (1 - n),$$

wobei

γ das spezifische Bodengewicht,

γ_w das Gewicht des Wassers,

n der Hohlraumgehalt des Bodens ist.

Strömungsauftrieb tritt auf bei Strömung senkrecht nach oben.

Der Strömungsdruck wirkt dann dem Raumgewicht entgegen..

Das kritische Gefälle dabei ist:

$$i_{krit} = (\gamma - \gamma_w) (1 - n) / \gamma_w$$

Durch den Strömungsdruck kann das Gefüge gelockert, das Gleichgewicht im Boden zerstört werden. Schwimmsanderscheinungen werden durch den kritischen Strömungsdruck verursacht. Dem von den Lagerungs- und Durchlässigkeitsverhältnissen abhängigen Strömungsdruck des Sickerwassers ist hinter Bohlwänden und Stützmauern große Bedeutung zu geben, da der Strömungsdruck, sobald er die Schwerkraft überwindet, dichte Lagerungen auflockert, den Erddruck stark ansteigen läßt.

Das Gewicht des Bodens wird durch das im Boden möglicherweise enthaltene Kapillarwasser, das von den Oberflächenspannungen des Wassers gehalten wird — durch Ueberfluten des Bodens werden jedoch diese den Erddruck vermindernden Spannungen ausgeschaltet — oder um das durch elektrochemische Vorgänge gebundene Wasser, durch das die Körner umhüllende Wasser und das von Häutchen gehaltene und von Häutchengruppen zurückgehaltene Wasser erhöht. Der Kapillardruck p_k vergrößert die Haftung zwischen den Bodenkörnern und erhöht die Reibung. — Weil die Gewichtsvermehrung von Einfluß ist, muß jeweils der Wassergehalt des Bodens wie seine mögliche Veränderung festgestellt werden.

Da bei wasserhaltigem Boden der Erddruck sehr vom Spannungszustand im Porenwasser abhängig ist, der Erddruck bei Porenwasserüberdruck sich erhöht, bei Unterdruck sich vermindert, sind die vorhandenen oder möglichen Zustände zu berücksichtigen. Besonders Ueberflutungen mit ihrem Einfluß auf die Spannungszustände in bindigem Boden sind zu beachten. Ueberdruck tritt im Porenwasser bei plötzlichen Bodendrücken über dem natürlichen Gleichgewichtszustand bis zum seitlichen Ausgleich und bei unter Druck stehendem Grundwasser auf. Unterdruck entsteht bei plötzlicher Entlastung oder infolge Kapillarspannungen. Regen erhöht den in Strömungsrichtung wirkenden Porenwasserdruck. Unter Wasser stehende bindige Böden besitzen spannungsloses Porenwasser.

Schließlich sind die durch das Wasser möglichen Einflüsse chemischer oder physikalischer Art, das Quellen von Anhydrit das Lösen von Kalk durch säurehaltiges Wasser u. a., die Konsistenzformen bindiger Böden und ihre dementsprechenden Eigenschaften gebührend zu berücksichtigen.

c) Schichtenneigung, Schichtendicke.

Jede nach dem Bauwerk zu einfallende Schicht ist bei Ermittlung des Erddruckes besonders zu beachten. Von wesentlichem Einfluß auf den Erddruck ist die Neigung der Grundwasser tragenden Schichten. Für jede Schicht sind die Kennziffernermittlungen und Erddruckberechnungen durchzuführen wobei ungefähre Mittelwerte hinreichend genügen, da die Beschaffenheit jeder Bodenschicht sowohl in senkrechter als auch in waagerechter Richtung wechselt.

Die Schichtendicke ist bei bindigen Böden auf die Konsolidierungszeit von Bedeutung. Kann das Porenwasser sowohl nach oben als nach unten durch durchlässige Schichten entweichen, so ist die Konsolidierungszeit dem Quadrat der Schichtdicke proportional im anderen Falle verlängert sich die Zeit.

Feiner Sand und Schluffschichten auf bindigen Böden, besonders wenn diese durchlässigen Schichten Neigung nach außen hin (zur Stützwand) haben, gleiten wassergesättigt und somit fast ohne jegliche Scherfestigkeit bei geringstem Anlaß, wie Erschütterung u. a. Die durch die Erschütterung z. B. plötzlich auftretende Formänderung bringt den Boden zum Fließen. Der Druck gegen die Stützmauer wächst dabei erheblich bis zum Bruch. Daher ist jede mögliche Rutschgefahr zu prüfen und durch geeignete Maßnahmen abzuwenden. — Bodenbewegungen können durch Veränderung der hydro-statischen oder statischen Verhältnisse oder Aenderung der Haftfestigkeit, Reibungsverhältnisse sowie durch Strukturzerstörung, wie vor bereits berichtet, veranlaßt werden¹⁾. — Bei der Ermittlung des Erddruckes für die verschiedenen Schichten können im allgemeinen sonst, von rutschgefährlichen Böden abgesehen, da im Rahmen der sowieso nur zu erreichenden Genauigkeit der Fehler zumeist unerheblich ist —, die Schichtentrennlinien parallel angenommen werden, wenn dieses auch tatsächlich nicht der Fall ist.

¹⁾ Eingehende Beispiele gibt v. Terzaghi in Ingenieurgeologie, Wien 1929, Julius Springer. [29]

d) Temperatur.

Genaue Beobachtungen von Stützmauern über längere Zeit ergaben, daß mit den Temperaturschwankungen auch die Erddruckwerte Veränderungen aufweisen. Mit der Temperaturerhöhung nimmt auch der Erddruck zu. Die Erddruckschwankungen infolge Temperaturänderungen sollen sich nach I. Feld²⁾ auf ungefähr 0,15% zu 1° belaufen.

e) Chemische und elektrische Einflüsse.

Unter dem Einfluß von Wasser, Luft verwandeln oder verändern sich verschiedene Beimengungen, wie z. B. Kalk, Humus, Salze, Gips und bedingen so die Veränderung der Bodeneigenschaften. Durch Versteinern sandiger Böden mittels Einspritzen von Chemikalien (Kieselsäure), von Zement, sind auf längere Zeit wesentliche Verbesserungen der Festigkeit, Erhöhung der Reibung, Haftfestigkeit u. a. erreichbar. Zur vorübergehenden Verbesserung der Bodeneigenschaften ist u. a. auch das Gefrierverfahren zu nennen. — Die Schubfestigkeit von Ton unterliegt stark chemischen Einflüssen. Nach L. Casagrande³⁾ sind größere Festigkeit und geringere Quellsfähigkeit von Tonen durch Einleitung von elektrischem Gleichstrom mittels Al-Anode und Cu-Kathode in den Tonboden infolge elektrischer Umlagerung der wasseransammelnden Na-, Ca- und Mg-Teilchen zu erreichen.

f) Erschütterungen, Verdichtungen.

Erschütterungen haben auf Böden ohne Haftfestigkeit großen Einfluß auf die Verdichtung. Verdichtungen von Schüttungen hinter Stützwänden bewirken eine wesentliche Erhöhung des Erddruckes. Durch Erschütterungen wird im Tonboden die innere Reibung durch den Konsolidierungsverzögerung gemindert. Auch treten durch die Erschütterungen Porenwasserdruckänderungen auf.

Infolge Strukturzerstörung unter dem Einfluß von Erschütterungen verlieren manche Tone ihre Steife und Festigkeit. Durch die Zerstörung von Wabenstrukturen können die mitunter in diesen sich befindenden flüssigen Feinsteile als Schmiermittel wirken.

g) Veränderungen.

Die durch künstliche oder natürliche Veränderungen im Boden durch benachbarten Druck oder Entlastung, durch Aushöhlungen infolge Auswaschungen, Auslaugen von Salzen, durch Bergbau, durch Gasausbrüche, Beben, Rutschungen, Frosterhebungen, Treiberscheinungen im Boden u. a. bewirkbaren Umstände sind, soweit die Voraussetzungen hierfür gegeben sind, schließlich eingehend zu beachten und von Fall zu Fall zu bewerten.

III. Abschnitt.

Der Boden hinter Wänden in Abhängigkeit von vorhandenen oder möglichen örtlichen Verhältnissen.

A) Beobachtungen und Messungen von Seitendruckwerten.

Die nachstehend wiedergegebenen Versuche und Messungen¹⁾, die unter Verwendung der vom Verfasser durchgebildeten Meßdosens mit Kupferblechmembran, die im Boden sorgfältigst jeweils eingebaut wurden, ausgeführt wurden, stellen nur einen geringen Teil der vom Verfasser seit 1927 durchgeführten Beobachtungen dar.

Abb. 5—11 zeigen deutlich die Veränderungen von ursprünglich waagerechten hinter einer Glasplatte im Versuchskasten geschichteten Sandlagen verschiedener Färbung infolge verschiedener Bewegung der abstützenden Wand.

Abb. 12 stellt Seitendruckwerte, die hinter verschiedenen 3,50 m hohen Modellwänden bei den beschriebenen Bewegungen gemessen wurden, dar.

²⁾ Trans. Am. Soc., Paper No. 1529, S. 1487—1490, siehe auch v. Terzaghi, Erdbaumechanik 1925, S. 331, Leipzig und Wien, Deuticke.

³⁾ L. Casagrande, Bautechn. 13 (1937), H. 1, S. 14.

¹⁾ Press, Bauingenieur 1937, Heft 47/48 Druckverteilung hinter ausgesteiften Bohlwänden und Steifendrücke; Bautechn. 1938, Heft 29 — Steifendrücke und ihre Veränderungen mit dem Bautortschritt; Ztrbl. d. Bauw. 1938, Heft 52 — Gemessene Bewegungen an geramten Spundwänden; Bauingenieur 1940, Heft 31/32 — Rutschung eines Brückenwiderlagers; Bautechn. 1942, Heft 31/32 — Versuche über die Druckverteilung hinter Stützwänden.

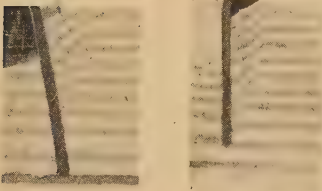
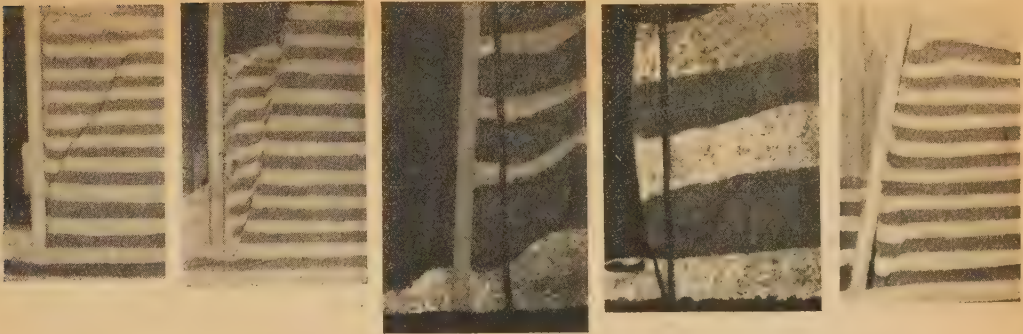


Abb. 5—11

Die Bewegung der Modellwände wurde, wie Abb. 12f wiedergibt, durch Pressen hervorgerufen. Die in den Abbildungen vermerkten Werte sind stets durch wiederholte Messungen überprüft worden. Dennoch ist darauf hinzuweisen, daß es sich stets jeweils nur um Messungen während eines bestimmten Zeitpunktes handelt, denn die Seitendruckwerte sind auch von der Zeit abhängig. Mit der Bewegung der Wand (Abb. 12a) um den Fußpunkt nehmen die Seitendruckwerte nach unten hin zu. Bei Bewegung der Wand um das obere Ende (Abb. 12b) ist eine Vergrößerung der Werte des Seitendruckes nach oben hin deutlich sichtbar.

Abb. 12e zeigt, daß die Seitendruckwerte im Bereich der größten Durchbiegung am geringsten sind. In Abb. 13 sind Beobachtungen von Seitendruckwerten hinter 3,20 m hohen starren Wänden bei Bewegung um den Fußpunkt und bei Wandbewegung um das obere Ende wiedergegeben.

In Abb. 14 sind die gemessenen Seitendruckwerte hinter einer 7,00 m hohen Wand, die sich fast gleichmäßig nach vorn verschoben hatte, aufgetragen.

Abb. 15 zeigt bei einer 1,60 m hohen Wand, die sich gleichfalls fast gleichmäßig nach vorn be-

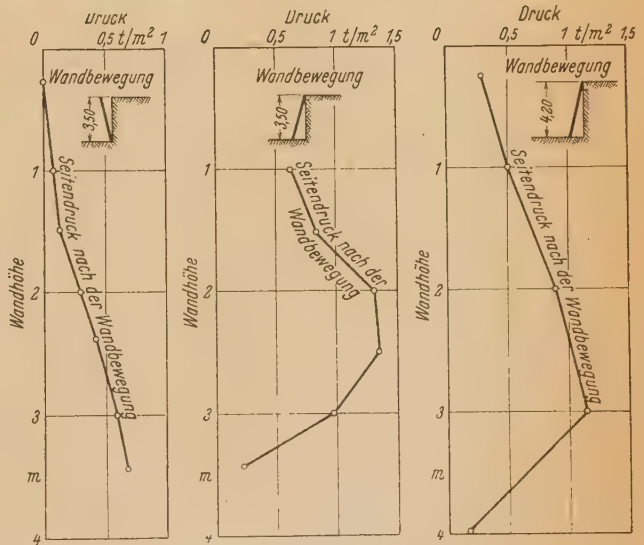


Abb. 12 a, b, c

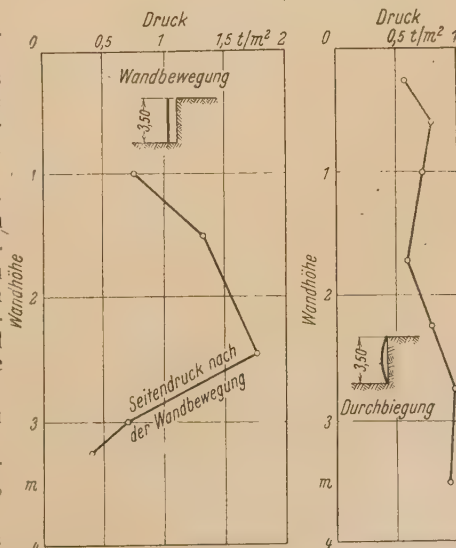
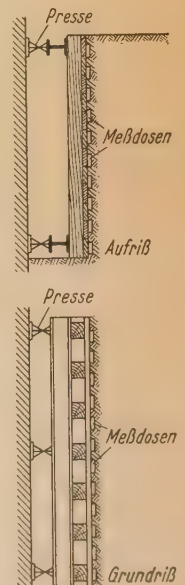


Abb. 12 d, e, f



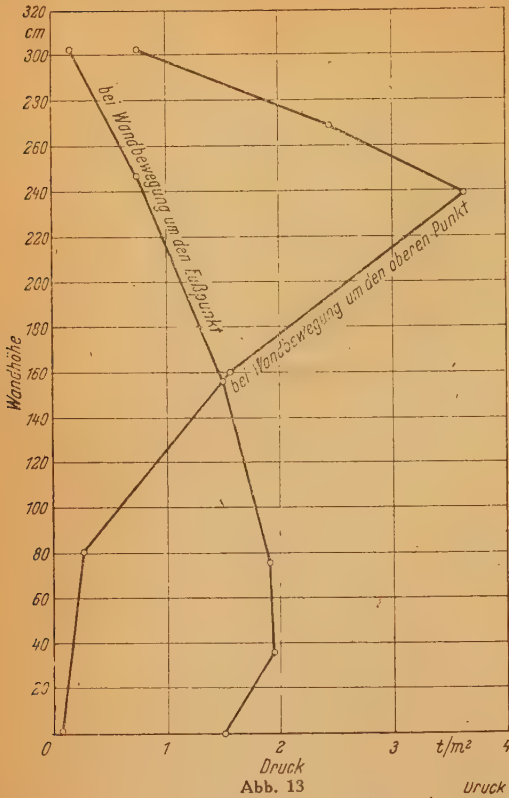


Abb. 13

weg hatte, die gemessenen Seitendruckwerte.

In Abb. 16 sind die hinter einer 7,00 m hohen als starr und nahezu unbeweglich festgestellten Stützmauer gemessenen Seitendruckwerte dargestellt.

In Abb. 17 sind die bei drei 7,00 m hohen Wänden

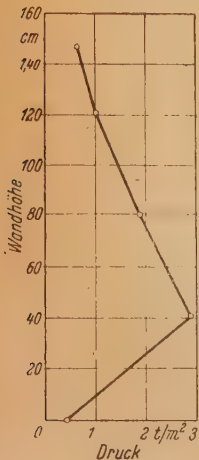


Abb. 15

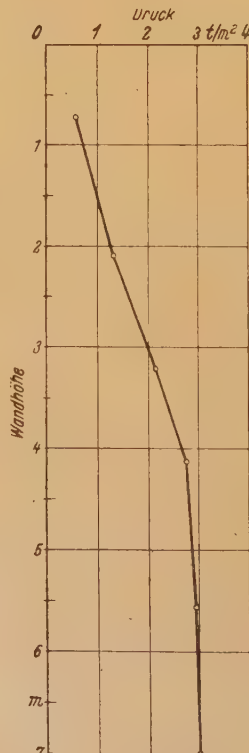


Abb. 16

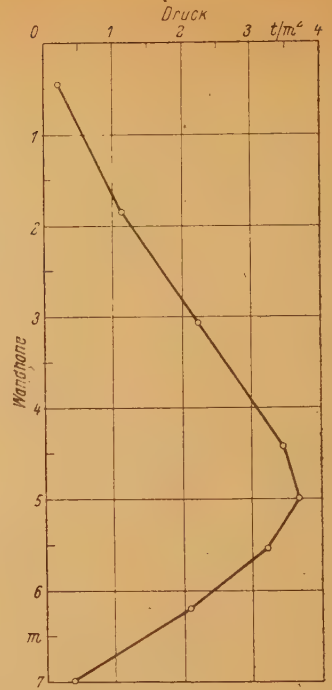


Abb. 14

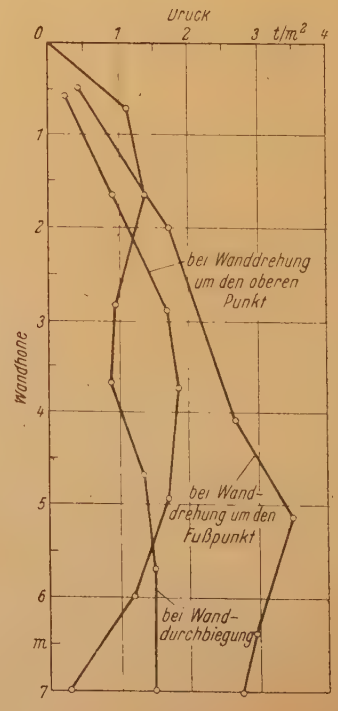


Abb. 17

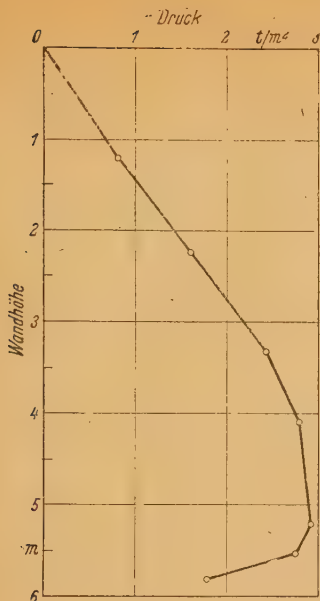
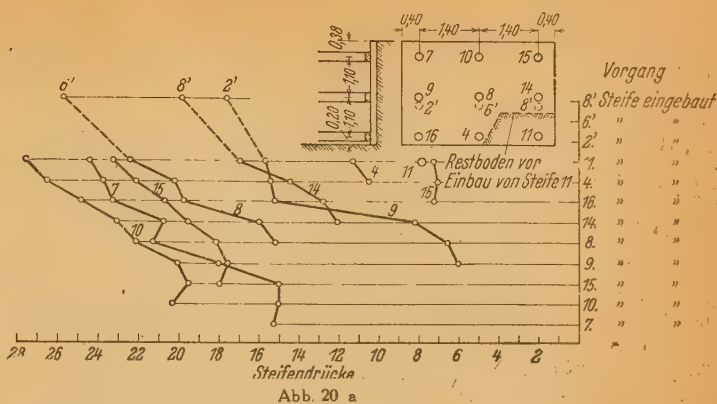


Abb. 18



in einem anderen Boden gemessenen Seitendruckwerte aufgezeichnet sowie dabei die beobachteten Wandbewegungen vermerkt. Messungen an einer als starr zu betrachtenden gleichfalls 7,00 m hohen Wand, bei der keine Bewegungen wahrgenommen wurden, im gleichen Boden ergaben bei 1,7 m Tiefe 2,4 t/m², bei 4,1 m Tiefe 4,3 t/m² bei 7,0 m Tiefe 6,2 t/m² | Erddruckwerte. Nach 2 Jahren wurde eine Zunahme um nahezu 20% festgestellt. Gegenüber den nach Coulomb errechenbaren Erddruckwerten ergaben sich bei unnachgiebiger Wand 2- bis 2,5 fach größere gemessene Werte.

Die hinter einer 6,00 m hohen Stahlbetonstützmauer, die sich oben um 0,4 cm, unten um 0,1 cm nach vorn geneigt hatte, beobachteten Seitendruckwerte sind in Abb. 18 wiedergegeben.

Hinter ausgesteiften eisernen Spundwänden von 7,50 m Länge wurden die in Abb. 19 dargestellten Werte bei den beschriebenen Steifendruck- und -abständen festgestellt. Um über die Vorgänge während der Bauausführung von Bohlwänden bzw. Aussteifungen Aufschluß zu erhalten, wurden vom Verfasser die in Abb. 20 a, 20 b, 20 c und

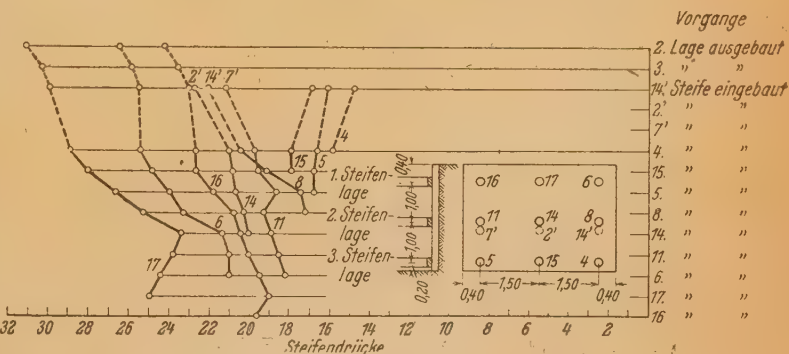


Abb. 20 b

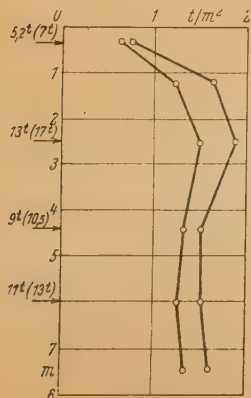
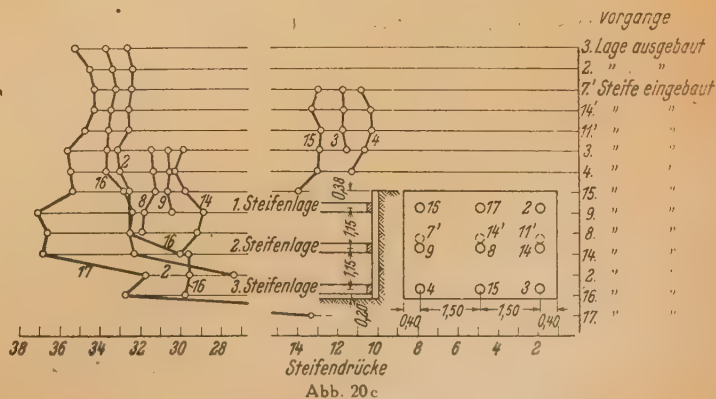


Abb. 19



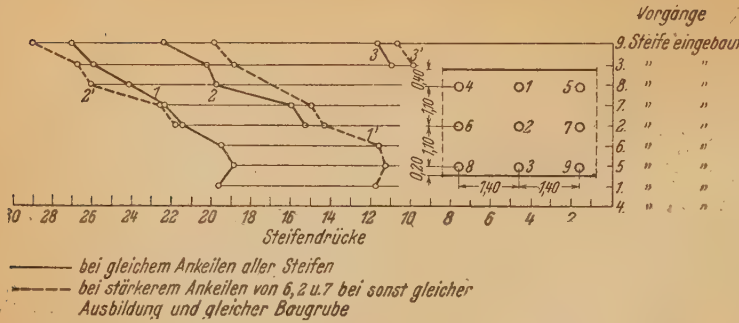


Abb. 21

Abb. 21 dargestellten Messungen während des Einbaus und Ankeilens der Steifen, des Umsteifens vorgenommen. Die Versuche wurden in einem 0,5% Ton und gering Kalk enthaltenen Sandboden vom Raumgewicht 1,732 und dem Hohlraumprozentatz von = 31 vorgenommen. Die dargestellten Kurven geben für jede Steife ein anschauliches Bild der Druckveränderungen mit den einzelnen Bauvorgängen.

Die Messungen der untersuchten Fälle ergaben:

1. daß die Steifen der obersten und mittleren Lage weit größere Kräfte zu übertragen haben als die unterste Steifenlage,
2. daß die Steifendrucke beachtlichen Schwankungen während der Bauvorgänge unterworfen sind und
3. daß ein übermäßiges Ankeilen einer Steifenlage allein schon eine wesentliche Veränderung im Gesamt der Stützendrücke ergibt.

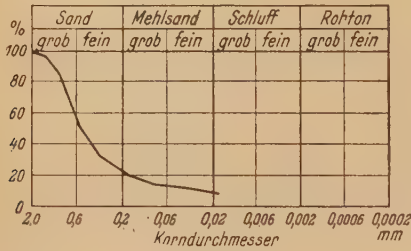


Abb. 22a

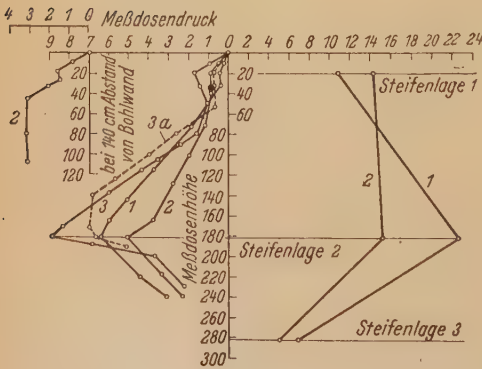


Abb. 22c

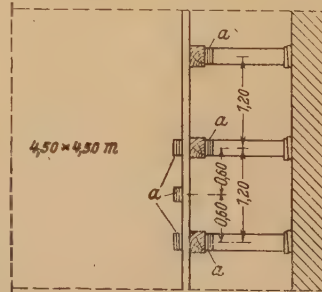
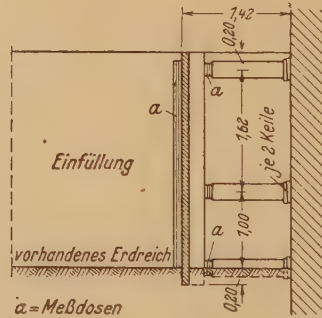


Abb. 22b

Die in Abb. 22c wiedergegebenen Seitendruckwerte der gemäß Abb. 22b durchgeführten Versuche wurden im Sand 1 vom Raumgewicht 1,67 und der in Abb. 22a dargestellten Kornverteilungskurve und dem Hohlraumprozentatz von = 34,8, im Sand 2 vom Hohlraumvolumen = 33,2% und im Sand 3 mit dem Hohlraumvolumen = 35,3% bei gleicher Kornzusammensetzung mittels der früher bereits beschriebenen Meßdosen ermittelt.

Die Werte der Kurve 3a wurden im Sand 3 bei in der Ebene c—d (Abb. 22b) eingebauten Meßdosen beobachtet.

Wie auch diese Versuche erweisen, sind bei Aussteifungen die oberen Werte wesentlich größer, als nach den früheren Annahmen ermittelbar war. Die Versuche zeigen bereits, daß die Druck

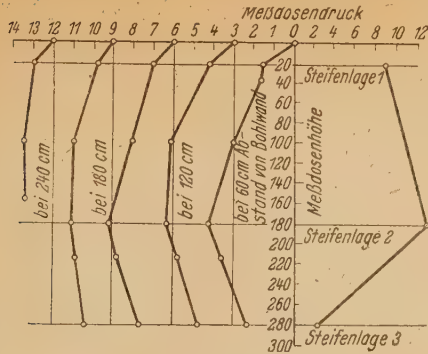


Abb. 23

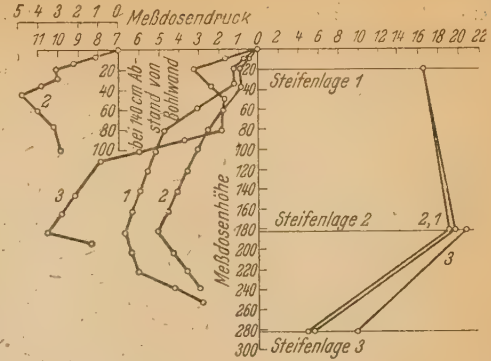


Abb. 24

verteilung hinter Bohlwänden in hohem Maße von dem Bauverfahren, der Anordnung der Brusthölzer, Träger, Steifen, dem Grad der Nachgiebigkeit u. a. abhängig ist.

Abb. 23 und Abb. 26 zeigen Druckverteilungskurven in verschiedenen Abständen von der Versuchsbohlwand. Aus den Kurven ist der Einwirkungsbereich der Stützdrücke erkennbar. In Abb. 24 sind die infolge gleichmäßig großer Belastung der Sande 1 und 2 und infolge größerer Beaufschlagung des Sandes 3 hinter der ausgesteiften Bohlwand gemessenen Seitendruckwerte aufgetragen.

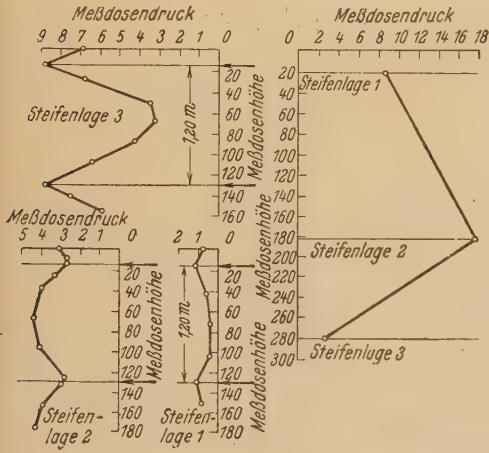


Abb. 25

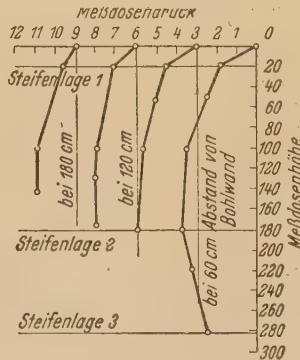


Abb. 26

Abb. 25 gibt die horizontale Druckverteilung in verschiedenen Höhenlagen hinter der Versuchsbohlwand wieder. Es ergab sich dabei in jeder Steifenhöhenlage bei jeder Steife ein Höchstwert, zwischen den Steifen ein Kleinstwert.

Die Kurven der Abb. 27 zeigen den Einfluß der angeordneten Entwässerung auf die Größe der Seitendruckwerte.

Abb. 28 und 29 geben hinter ausgesteiften Trägerbohlwänden (Berliner Untergrundbahn-Bauweise)

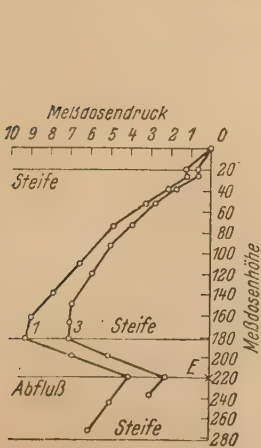


Abb. 27

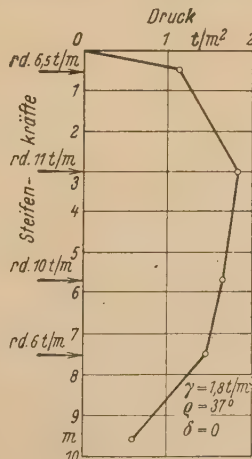


Abb. 28

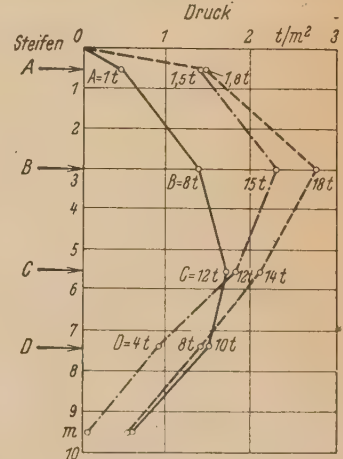


Abb. 29

bei den eingetragenen Steifendrücken gemessene Seitendruckwerte wieder. Die Abhängigkeit der Seitendruckwerte von der Größe der Steifenkräfte ist eindeutig ersichtlich.

In Abb. 30, 31 und 32 sind infolge wandernder Einzellasten bei verschiedener Wandbewegung auftretende zusätzliche Seitendrucke aufgetragen.

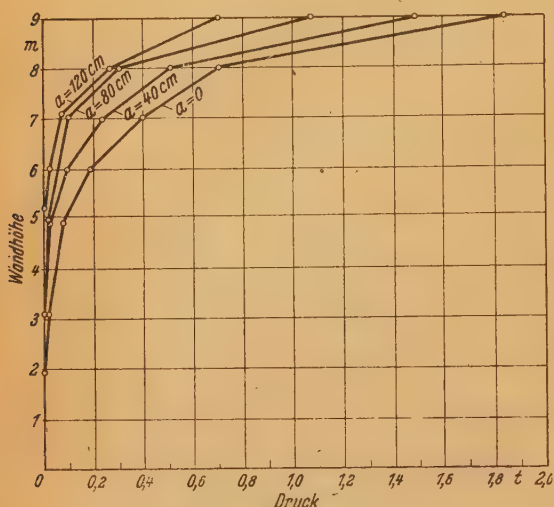


Abb. 30

Abb. 33 a stellt den Einfluß der Laststellung bei gleichgroßer Last, Abb. 33 b den Einfluß der Lastgröße bei gleicher Laststellung dar.

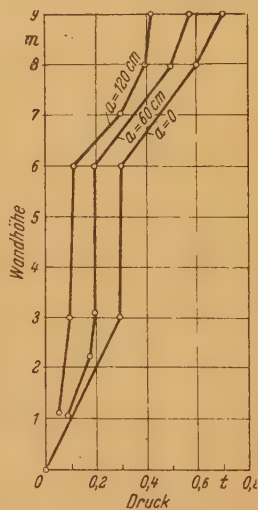


Abb. 31

Abb. 33 c schließlich gibt den Einfluß verschiedener Neigungen der Bodenfläche auf die Seitendruckwerte wieder.

B. Ermittlung der Seitendruckwerte.

Auf Grund der bisherigen Beobachtungen und Messungen ist unter Berücksichtigung der neuen von zahlreichen Forschern ermittelten Erkenntnis festzustellen, daß die Größe und die Verteilung des Erd-

druckes, die Lage des Angriffspunktes der ihn ersetzenden Mittelkraft sowie die Richtung dieser Erddruckresultierenden und die Gleitflächen, besser Gleitkörper-Formen wesentlich durch die Nachgiebigkeit und Elastizität der Stützwände, durch das Bauverfahren bei der Ausführung, durch die Anordnung und Größe der Gegenkräfte (wie z. B. der Steifenkräfte), wie auch durch die Höhe der hinterfüllten Stützwand (wie die Versuche ergaben, ist auch die Höhe der Stützwand zu beachten) bzw. der Höhe der Hinterfüllung bedingt ist, abgesehen von dem unter Abschnitt I und II Aufgeführten, wie

unter anderem von der Beschaffenheit des Bodens wie dem Reibungswinkel dem Raumgewicht seines Wasser-
gehaltes und der Art der Entwässerung des Bodens hinter der Wand.

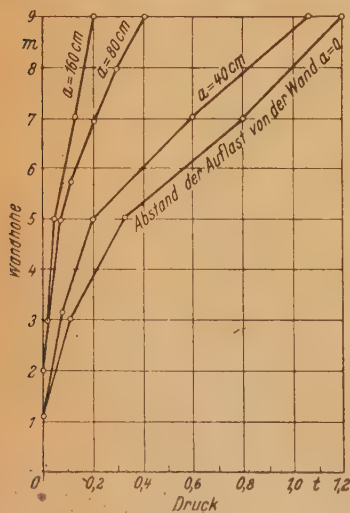


Abb. 32

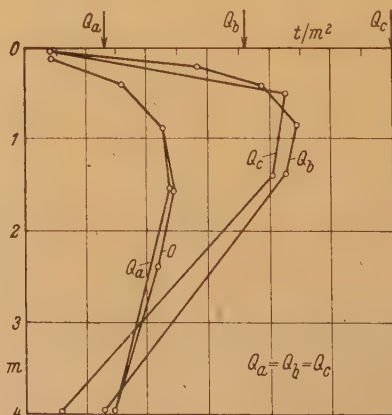


Abb. 33 a

Das Nachgeben der Stützwand infolge des Erddruckes ermöglicht das Nachrutschen von Boden und die elastische Ausdehnung des Bodens nach der Stützwand zu. Dadurch wird der Druck geringer. Je elastischer ein Teil der Stützwand ist, um so geringer wird der Druck darauf. Steifere Teile des Bauwerkes dagegen haben mehr Druck zu übernehmen. — Der mit dem Nachgeben der Stützwand eintretende Seiten-

druckabfall kann sehr erheblich sein, andererseits trägt die anfängliche Unnachgiebigkeit von Stützmauern z. B. zur weiteren Drucksteigerung bei. — Nach einem Druckabfall steigt jedoch nach Stillstand der Bewegung der Seitendruck bis zur weiteren Bewegung wieder an und sofort bis gegebenenfalls zum Bruch.

In homogenen Sandschüttungen mit waagerechter Oberfläche sind die lotrechten Spannungen in der Tiefe h , dem Druck der Auflast $= \gamma \cdot h$ gleich. Die waagerechte Spannung „der Erddruck der Ruhe“ in gleicher Tiefe h ist $E_w = \gamma h \cdot \lambda_0$;

für Sand ist

λ_0 etwa 0,4—0,5,

für Ton ist

λ_0 etwa 0,6—0,75

wobei λ_0 der Beiwert des Ruhe-Erddrucks ist.

Ohne Wandbewegung wird dieser Druck auch gegen eine starre Stützwand gleich groß und waagrecht bleiben.

Tritt jedoch eine, wenn auch sehr geringfügige Stützwandbewegung ein, so sinkt der Erddruck auf das geringste Maß, den aktiven Erddruck, ab. Auch die Angriffsrichtung des Erddrucks ändert sich zumeist dabei.

Aus dem „Ruhedruck des Erddrucks“ sind die allgemein als „aktiver“ und „passiver“ Erddruck benannten Grenzzustände des Erddrucks mithin herleitbar. Der untere Grenzzustand (aktiver Erddruck) tritt auf, wenn durch eine Dreh- oder Vorwärtswandbewegung der Stützwand der Boden entlastet wird und ein Gleitkörper nach Ueberwinden der inneren Reibung und der Festigkeit der aneinander haftenden Bodenteile sich bildet, der obere Grenzzustand (passiver Erddruck) mit einer zusätzlichen Belastung tritt bei Bewegung durch das Vorschieben des vor dem Fuß der Stützwand stehenden Bodens auf, wobei sich gleichfalls ein Gleitkörper bildet.

Die Entlastung führt zu einer wenn auch geringen elastischen Ausdehnung des Bodens, gegebenenfalls einem Nachrutschen von Boden, die Belastung zu einem Zusammendrücken, einer Verdichtung, je nach Dichte ein Hineinkriechen von Bodenteilen in vorhandene Hohlräume.

Bei Sanden ist die elastische Ausdehnung gering, bei Tonen mitunter erheblich.

Für die Größe der Bodendruckwerte an der Wand ist wie bei der Sohldruckverteilung, die durch die Lastverteilung und Elastizität der Stützwand hervorgerufene Verformung mit maßgebend. Die durch die äußeren Kräfte verursachten Biegelinien im Boden müssen denen der Stützwand entsprechen. Umgekehrt müssen aber auch die im Boden erzeugten Gegenkräfte in der Wand Reaktionen hervorrufen.

Die Erddruckberechnung ist somit unter Eingehen auf die Formänderung von Wand und Boden durchzuführen.

Zur Ermittlung des Erddrucks vor der „Gleitflächen“-Bildung ist die Elastizität und Nachgiebigkeit der Stützwand, die Minderungen des Erddrucks verursachen, zu ermitteln. Mit dem Nachgeben der Wand nimmt der Seitendruck zunächst stärker, dann schwächer ab. Die Gleitkörperbildung erfolgt ziemlich plötzlich.

Auf die 1. Gleitung folgt eine 2. und so fort. Mit der Gleitung tritt u. U. Auflockerung ein. Nach Erreichen des Größtwertes ist der Abfall des Gleitwiderstandes bei bindigen Böden größer als bei Sand und mit dem größeren Haftfähigkeitsanteil umso größer. Die Ziffer des inneren Gleitwiderstandes ist u. a. von den Umständen, unter denen die Wandbewegung vor sich geht, abhängig. Der „Gleitkörper“ bleibt nicht konstant, sondern ändert sich. Die Coulomb'sche Erddrucktheorie fußt mit der Annahme ebener Gleitflächen auf linearer Erddruckverteilung über die Wand.

Sie nimmt ferner an, daß von allen möglichen Gleitflächen die auftritt, für die der Erddruck einen Größtwert erreicht, daß alle Teile des Erdkörpers den Gleichgewichtsbedingungen genügen und daß die Resultierende der „Gleitfläche“ zur Senkrechten um den Reibungswinkel ρ geneigt ist. Wie die Messungen ergaben, stimmen die nach Coulomb errechneten Werte nicht mit den festgestellten Werten überein.

Nur hohe, starre Stützmauern ohne wesentlichen Einfluß bedingende Setzung, die um den Fußpunkt sich bewegen, kippen, zeigen in Annäherung eine mit der Coulomb'schen Theorie übereinstimmende lineare Druckverteilung. Für sie gilt allein das Coulomb'sche Verfahren zur Ermitt-

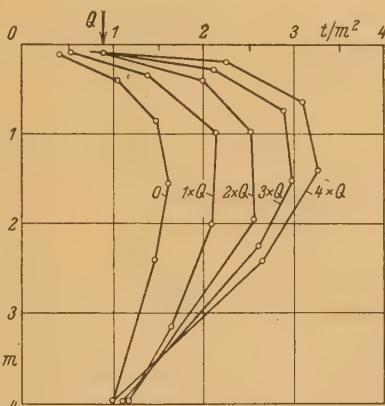


Abb. 33b

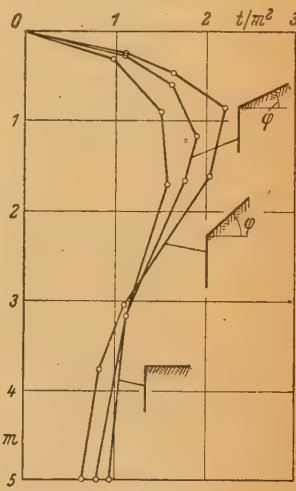


Abb. 33c

lung des Erddruckes in Annäherung. Bei ihnen nur wurde der Erddruckangriffspunkt in etwa $h/3$ Höhe festgestellt.

Auch bei unnachgiebigen, oder fast unnachgiebigen Wänden tritt eine lineare mit der Tiefe zunehmende Druckverteilung auf, jedoch sind die Erddruckwerte erheblich größer als nach Coulomb zu ermitteln ist.

Infolge der mit der Zeit erfolgenden Verdichtung des Bodens hinter den Wänden, der durch Erschütterungen oder Wasseraufnahme verursachten Veränderungen im Boden, wie Kornumlagerungen, wurden nach Jahren bis nahezu 25% Zunahme der anfänglich gemessenen Erddruckwerte festgestellt.

Schon eine Parallelbewegung einer hohen, starren Stützmauer führt zu einer wesentlich anderen, nicht mehr linearen Druckverteilung, bei der die Resultierende des Erddruckes über dem unteren $\frac{h}{3}$ liegt. Bei Bewegung der Stützwand um das obere Ende bei gleichfalls nicht linearer Druckverteilung liegt die Resultierende u. U. im oberen Drittel.

Die Erddruckverteilung wie auch die Gleitkörperform ist jeweils u. a. von der Wandbewegung bzw. dem Gegendruck abhängig, und somit ist auch die Lage des Angriffspunktes der Resultierenden des Erddruckes sowie die Richtung der Resultierenden von der Wandbewegung bedingt. Mit zunehmender Wandbewegung nehmen die Erddruckwerte ab, wobei der Abfall bei Parallelbewegung gegenüber Bewegung um Kopf- oder Fußpunkt zuerst größer ist.

Es ist daher die mögliche Wandbewegung zunächst als ausschlaggebend vor jeder Erddruckberechnung zu ermitteln und es sind nach der möglichen Wandbewegung die erforderlichen Annahmen zur Erddruckberechnung zu stellen.²⁾

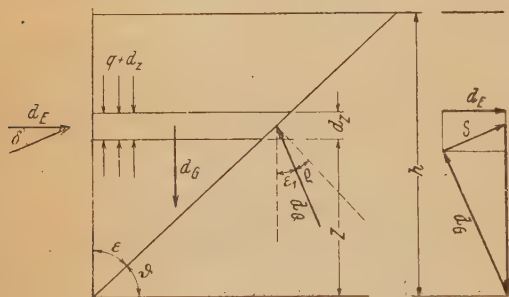


Abb. 34

Es ist (Abb. 34) $dE = \lambda q dz$
wobei λ der Beiwert des Erddruckes näherungsweise

$$\lambda = \left(\frac{\tan \delta + \cotg \varepsilon_1}{\tan \varepsilon} \right) \left(1 + c \frac{z}{h} \right) \text{ ist.}$$

$$\text{Aus } q \left(1 + c \frac{z}{h} \right) = z \left(\gamma dz + dq \right) + q dz$$

erhält man durch Integrieren bei $q=0$ $z=h$

$$q = \gamma \cdot \frac{h}{c} \left(1 - e^{-c \cdot \frac{h-z}{h}} \right)$$

Auch die Erddruckberechnung einer eingespannten oder verankerten Spundwand ist ohne Kenntnis der Bewegungsmöglichkeit und der von der Biegelinie der Spundwand abhängigen Druckverteilung in Annäherung nicht durchführbar. — Dinspannungen von beachtlicher Bedeutung. Je keit des Bodens sind bei Verankerungen oder Eie Verdichtungsfähigkeit, die Zusammendrückbar größer die Zusammendrückbarkeit, umso größer sind die Bewegungen, bis die Gegenkräfte wirksam werden.

Intolge erheblicher Bewegungen im Boden durch Verdichtungen, Sackungen u. a. hinter den Wänden kann der Erddruck (aktiver Erddruck) den Wert des Erdwiderstandes (passiver Erddruck) erlangen. Auf den Erdwiderstand, über den auch eingehende Versuche und Beobachtungen gemacht wurden, soll in dieser Abhandlung jedoch nicht näher eingegangen werden.

Eine Berechnung von Bohlwänden und Aussteifungen nach Coulomb führt — wie die Messungen ergaben — in den oberen Teilen der Bohlwände und Steifen zu zu geringen Abmessungen, wie auch durch manche Bauunfälle erwiesen ist. Bei bindigen Böden, steifen Baugrubenaussteifungen, stark angekeilten Steifen, so daß sich ein Gleitkörper nicht bilden kann — erreicht der Erddruck einen weit über den nach Coulomb ermittelbaren Wert.

²⁾ Terzaghi berechnet unter Annahme ebener Gleitflächen und daß in der durch q belasteten Fläche keine Schubspannungen vorhanden sind, bei Reibung zwischen Wand und Boden und unter Berücksichtigung der zwischen der Wandbewegung und der Druckverteilung bestehenden Beziehungen in Annäherung die waagerechte Teilspannung V des Erddruckes zu

$$V = \gamma \cdot \frac{h}{c} \left(1 - e^{-c \cdot \frac{h-z}{h}} \right) \left(1 + c \frac{z}{h} \right) \left(\frac{\tan \delta + \cotg \varepsilon_1}{\tan \varepsilon} \right)$$

wobei c eine je nach der von der Wandbewegung zu erwartende Druckverteilung abhängige durch Versuche oder nach ähnlichen bekannten Umständen festgelegte Konstante ist¹⁾.

1) Hierzu [10, 22, 24, 5].

Der Grad der Nachgiebigkeit der Aussteifung, das elastische Verhalten der Steifung sind wesentliche Faktoren bei der Berechnung.

Die Berücksichtigung des Gleitwiderstandes K (Kohäsion), der die Gleitung beeinflusst, wird allgemein nach Fellenius [9] für jede Höhe entgegengesetzt der jeweiligen Gleitrichtung (Abb. 35)

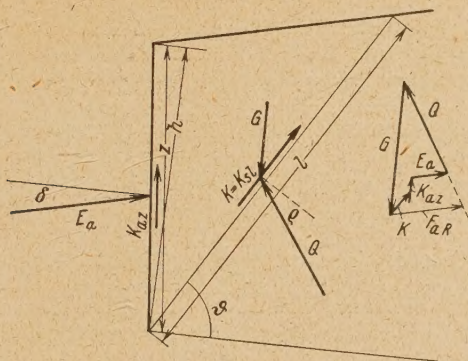


Abb. 35

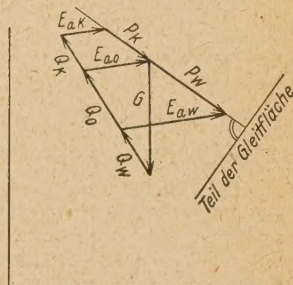


Abb. 36

mithin zu $-2Kh\sqrt{\lambda_a}$ angesetzt, wobei λ_a als Erddruckziffer

$\lambda_a < \lambda_o < \lambda_w$ (λ_w = Erdwiderstandsziffer) ist.

Der die Neigung des Gleitkörpers nicht beeinflussende Porenwasserdruck p_w und der Kapillardruck p_k werden senkrecht in den verschiedenen Höhen zur jeweiligen Gleitflächenlage wirkend (Abb. 36) angesetzt und ihr Einfluß auf den Erddruck nach Bestimmung des Erddruckes zumeist graphisch bestimmt, wobei p_w bei strömendem Porenwasser in Richtung der Strömung anzusetzen ist.

Schlußwort.

Erst eine große Zahl umfangreicher Beobachtungen und Messungen unter Angabe der vorbenannten Kennziffern und Werte sowie der Umstände, insbesondere auch aller Daten des Bauwerkes und seiner Herstellung geben die Voraussetzung zur genauen Aufstellung und Prüfung von Rechtsgrundlagen.

Gegenüber langwieriger Rechnungsverfahren, die die wesentlichen Faktoren nicht oder nicht richtig berücksichtigen oder bei denen diese Werte falsch angenommen werden, ermöglichen aber gewissenhafte Beachtung der wesentlichen Bodenkennziffern, der Bewegungsmöglichkeiten von Boden und Bauwerk durch entsprechende Annahmen bei der Berechnung durchaus sichere und schnell zum Ziel führende Näherungsverfahren.

Schrifttumsverzeichnis

1. Brandt, Die Grenzen der Gültigkeit der Erddrucktheorien von Rankine und Coulomb. Bautechn. 4 (1926), S. 755—758.
2. Buchwald, Neues vom Erddruck. Bautechn. 11 (1933), S. 605—606.
3. Brennecke-Lohmeyer, Der Grundbau, 4. Aufl., Berlin 1942, Wilh. Ernst & Sohn.
4. Casagrande, L., Die Hinterfüllung der Bauwerke. Die Straße 38, Heft 20.
5. Casagrande, A. Vortrag über die Terzaghische Erddrucktheorie, Schriftreihe der Straße, 1936, Heft 3.
6. Coulomb, Essai sur une application des règles de maximes et minimis. Mémoires de mathém. et phys. présentées à l'Académie Roy des Sciences par dévers savants. Vol. VII, Paris 1776.
7. Dischinger, Die Ursache des Einsturzes der Baugrube der Berliner Nord-Süd-S-Bahn, Bauing. (1937), Heft 9 10, S. 107—112.
8. Dörr, Erddruck auf die Wände ausgesteifter Baugruben. Bautechn. 20 (1942), Heft 6, S. 54—55.
9. Fellenius, Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion unter Annahme kreis-zylindrischer Gleitflächen. 3. Aufl. Berlin 1948. Wilh. Ernst & Sohn.
10. Forchheimer, Versuche über Gleitflächenbildung. Jahrb. f. Mineralogie 1893, Bd. I.
11. Hertwig, Die Berechnung der Baugrubenaussteifung. Bautechn. 20 (1942), Heft 19/20, S. 172.

12. Hertwig, Bemerkungen über neuere Erddruckuntersuchungen. Berlin 1939, Jul. Springer.
13. Homberg, Beitrag zur Berechnung der Erddruckverteilung. Bautechn. 17 (1939), Heft 34, S. 474—476.
14. Krey, Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes 5. Aufl. Berlin 1936. Wilh. Ernst & Sohn.
15. Klenner, Versuche über die Verteilung des Erddruckes über die Wände ausgesteifter Baugruben. Bautechn. 19 (1941), Heft 29, S. 316—319.
16. Lorenz, Neue Ergebnisse der dynamischen Baugrunduntersuchung. Z.d.Vdl., 78 (1934), S. 379—385.
17. Lehmann, Der Einfluß von Auflasten auf die Verteilung des Erdangriffes an Baugrubenwänden. Bautechn. 21 (1943), Heft 3/4, S. 21—24.
18. Müller-Breslau, Erddruck auf Stützmauern. Stuttgart u. Leipzig 1906, Kröner.
19. Mohr, Beitrag zur Theorie des Erddruckes. Zeitschr. d. Arch. u. Ing. Vereins Hannover, 1871.
20. Mund, Die Verteilung des Erddruckes bei gleichförmiger Auflast nach der Theorie von Coulomb. Bautechn. 13 (1935), Heft 20, S. 253—255. — Der Rebhann'sche Satz. Bautechn. 14 (1936), S. 441, u. Berlin 1936, Wilh. Ernst & Sohn.
21. Niebuhr, Ueber die Messung der Kräfte in einer Baugrubenaussteifung. Bautechn. 16, (1938), Heft 1, S. 11.
22. Ohde, Zur Theorie des Erddruckes unter besonderer Berücksichtigung der Erddruckverteilung. Bautechn. 16 (1938), Heft 10/11, S. 150—159; Heft 13, S. 176—180; Heft 19, S. 241—245; Heft 25, S. 331—335; Heft 42, S. 570—571.
23. Rankine, On the stability of loose earth. Phil. Trans. London 147 1857.
24. Rendulic, Gleitflächen, Prüfflächen und Erddruck. Bautechn. 18 (1940), Heft 13 14, S. 146—164.
25. Schroeter, Der Coulomb'sche Erddruck aus Hinterfüllung und bei Auflasten. Bautechn. 18 (1940), Heft 44/45, S. 505—514.
26. Spilker, Mitteilung über die Messung der Kräfte in einer Baugrubenaussteifung. Bautechn. 15 (1937), Heft 1, S. 16.
27. v. Terzaghi, Die Coulomb'sche Gleichung für den Scherwiderstand bindiger Böden. Bautechn. 16 (1938), S. 344.
28. v. Terzaghi, Erdbaumechanik. Leipzig u. Wien 1925, Franz Deuticke.
29. v. Terzaghi, Ingenieurgeologie. Wien 1929, Julius Springer.

